MESURE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION D'UN BAIN DE FUSION EN SOUDAGE GTAW

Etude No. 137
IGM84-160-237

MESURE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION D'UN BAIN DE FUSION EN SOUDAGE GTAW

Fait par

INSTITUT DE RECHERCHE D'HYDRO-QUEBEC

pour

INSTITUT DE GENIE DES MATERIAUX

CNRC 23864
765

Note au lecteur:

Les idées exprimées dans ce document sont celles de l'auteur (ou du contractant) et ne sont pas nécessairement partagées par l'Institut de génie des matériaux ou par le Conseil national de recherches Canada. L'auteur (ou le contractant) en assume l'entière responsabilité.

Si la demande est suffisante, des exemplaires supplémentaires de cet ouvrage pourront être disponibles dans la seconde langue officielle (français ou anglais).

Note to the reader:

The views expressed in this document are those of the author (or contractor) who assumes their full responsibility. They are not necessarily shared by the Industrial Materials Research Institute or the National Research Council of Canada.

If sufficient requests are received, a copy of this document will be made available in the other official language (French or English).

Institut de Recherche
de l'Hydro-Québec
Varennes, P.Q., Canada

IREQ

RAPPORT
Nº 8RT/3080C

CLASSIFICATION GENERALE:

AUTEUR(S): INITIALE(S)

J.-L. FIHEY, Ph.D
BRUCE HAZEL

DIRECTION: PROD. ET UTIL. DE L'ÉNERGIE

DATE: 84.06.20

Nº DE PROJET: 01581-574-57823

COLLABORATEURS
P. GIRARD Ph.D, A. DI VINCENZO
J. LAROUCHE

APPROUVÉ PAR:
Raymond Roberge
Antoine Thuret 84/06/

REQUIS PAR:
MAS. (IGM)

TITRE DU RAPPORT:

MESURE DE LA PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION D'UN BAIN DE FUSION EN SOUDAGE GTAW

☐ PAGES DE TEXTE ☐ TABLEAUX ☐ DESSINS ☐ PHOTOS ☐ OSCILLOGR.

SOMMAIRE:

La profondeur de pénétration d'un bain de fusion en soudage à l'arc électrique est le paramètre le plus difficile à mesurer en temps réel. Il est possible de détecter une pénétration complète lorsqu'on a accès à l'endos de la soudure, toutefois lorsque seule la partie faisant face à la torche est accessible peu de techniques fonctionnent et même il n'existe à notre connaissance aucune méthode de mesure de pénétration partielle. Dans ce travail nous proposons une approche originale basée sur la mesure du temps de solidification du bain, après extinction de l'arc, par un capteur infrarouge. Cette mesure peut être combinée soit à la mesure des gradients thermiques latéraux soit à la mesure de la vitesse de refroidissement après solidification pour fournir une valeur relativement précise de la pénétration.

Un système de mesure à miniordinateur a été mis au point pour automatiser toute la procédure, ce système permet également de mesurer en temps réel la largeur du bain.

LE CONTENU DE CE RAPPORT EST LA PROPRIÉTÉ DE L'INSTITUT DE RECHERCHE DE L'HYDRO-QUÉBEC

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1.	INTRODUCTION	1
2.	THÉORIE DE LA MESURE DE PÉNÉTRATION PAR ANALYSE DE L'ÉMISSION INFRAROUGE DU BAIN	3
	2.1 Méthode utilisant le temps de solidification et les gradients thermiques latéraux	3
	2.2 Méthode utilisant le temps de solidification et la vitesse de refroidissement après solidification	6
3.	LES CAPTEURS INFRAROUGES À FIBRE OPTIQUE	9
4.	DÉVELOPPEMENT DES ALGORITHMES DE MESURE SUR ORDINATEUR HP 9826	13
	4.1 Programmes d'acquisition	13
	4.2 Mesure du temps de solidification et de la vitesse de refroidissement après solidification	13
	4.3 Mesure de la largeur du bain et des gradients latéraux	19
	4.4 Élaboration de la structure de données et des algorithmes de mesure	25
	4.4.1 Description des filtres numériques	26
	4.4.2 Calcul de la pente par régression linéaire	27
	4.4.3 Calcul des convexités	29
	4.4.4 Résultats typiques	30
5.	FABRICATION DU SYSTÈME DE MESURE À MICROORDINATEUR	38
	5.1 Description du système	38
	5.2 Mode d'emploi du microordinateur	38
	5.2.1 Le panneau avant	38
	5.2.2 Le panneau arrière	42
	5.2.3 Procédures de soudage	45

		Page
6.	**RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**	48
	6.1 Soudage GTAW par point sur acier inoxydable	48
	6.2 Soudage GTAW par point sur acier au carbone	68
7.	**CONCLUSION**	80

1. INTRODUCTION

Les soudeuses automatiques et plus récemment les robots de soudage prennent la place de l'homme dans des nombreuses applications pour améliorer la productivité ou réduire l'exposition du soudeur à un milieu hostile. Pour pouvoir assurer une qualité constante de la soudure ces machines sont de plus en plus équipées de capteurs pour mesurer et contrôler un grand nombre de paramètres parmi lesquels les plus importants sont la géométrie de la soudure et son histoire thermique (gradients, vitesses de refroidissement).

La profondeur de pénétration est certainement le paramètre le plus difficile à mesurer. Il est possible de détecter une pénétration complète lorsqu'on a accès à l'endos de la soudure, toutefois lorsque seul la partie faisant face à la torche est accessible, peu de techniques fonctionnent. De plus, il n'existe à l'heure actuelle à notre connaissance aucune méthode de mesure de pénétration partielle.

Dans le cadre du projet OSD 81-0057 "Régulation en temps réel du soudage automatique à l'arc électrique" où l'IREQ agissait à titre de sous-contractant pour l'ISC, nous avons montré qu'il était possible de mesurer en temps réel à l'aide d'un capteur infrarouge les trois paramètres suivants (1):

- La largeur du bain de fusion.
- Les gradients thermiques de part et d'autre du bain.
- Le temps de solidification d'un bain de fusion après extinction de l'arc.

Un modèle théorique a été développé pour calculer à partir des deux derniers paramètres la profondeur de pénétration.

Les travaux que nous présentons dans ce rapport complètent le projet précédent. Dans un premier temps on y propose une nouvelle équation

analytique reliant la pénétration au temps de solidification et à la vitesse de refroidissement après solidification. Ces deux paramètres peuvent être calculés à partir de l'information provenant d'un seul capteur infrarouge ce qui simplifie notablement la mesure. Les étapes de développement, de construction et de mise en service d'un système de mesure à microordinateur sont ensuite détaillées et on donne une première évaluation de la précision du système ainsi que de son potentiel.

1. INTRODUCTION

Automatic welders and, more recently, robot welders are taking man's place in many applications to improve productivity or reduce the exposure of professional welders to hostile environments. To ensure consistency of weld quality, these machines are being equipped with more and more sensors to measure and control a large number of parameters, the most important of which are weld geometry and thermal chronology (gradients and cooling rates).

Depth of penetration is certainly the most difficult parameter to measure. Complete penetration can be detected when there is access to the back of the weld, but few techniques work when only the part facing the torch is accessible. Moreover, to our knowledge no method exists at the moment for measuring partial penetration.

Under project OSD 81-0057, "Régulation ene temps réel du soudage automatique à l'arc électrique" [real time control of automatic electric arc welding], in which IREQ acted as a subcontractor for the ISC, we showed that the following three parameters could be measured in real time using an infrared sensor (1):

- width of the weld pool;
- thermal gradients from one part to another of the pool;
- solidification time of a weld pool after extinction of the arc.

A theoretical model was developed to calculate the penetration depth from the last two parameters.

The work we describe in this report completes the above project. First a new analytical equation is proposed relating penetration to the solidification time and to the cooling rate after solidification. These two parameters can be calculated from the information provided by a single infrared sensor, a considerable simplification in measurement. The development, construction and implementation stages of a microcomputer measurement system are then detailed, with an initial evaluation of the system's accuracy and potential.

2. THÉORIE DE LA MESURE DE PÉNÉTRATION PAR ANALYSE DE L'ÉMISSION INFRAROUGE DU BAIN DE FUSION

2.1 Méthode utilisant le temps de solidification et les gradients thermiques latéraux

Considérons le problème de la solidification d'un bain de fusion après extinction de l'arc (figure 1). La chaleur de surchauffe et la chaleur latente de fusion accumulées dans le bain de fusion vont se dissiper à une vitesse qui dépend du gradient thermique dans le métal solide entourant le bain de fusion. Nous devons donc résoudre un problème d'écoulement thermique tridimensionnel dans une étape transitoire dont la solution est complexe et ne peut être trouvée analytiquement. Dans l'optique de l'utilisation d'un microprocesseur pour mesurer en temps réel la pénétration, il nous faut simplifier l'approche pour minimiser le temps de calcul.

Le problème peut être simplifié en faisant les hypothèses suivantes:

- La surchauffe dans le bain de fusion est négligeable.
- Le gradient thermique dans le solide à l'interface liquide-solide est indépendant de la position et du temps pendant la solidification.
- Le bain de fusion a la géométrie d'une portion de sphère.
- La divergence du flux thermique peut être négligée.

Bien que toutes ces hypothèses ne soient pas complètement valides, nous avons dans une étude précédente (2) démontré que ces approximations étaient acceptables pour de petits bains de fusion dont la profondeur est inférieure à 3,5 mm.

À partir des hypothèses précédentes on peut écrire l'équation différentielle suivante:

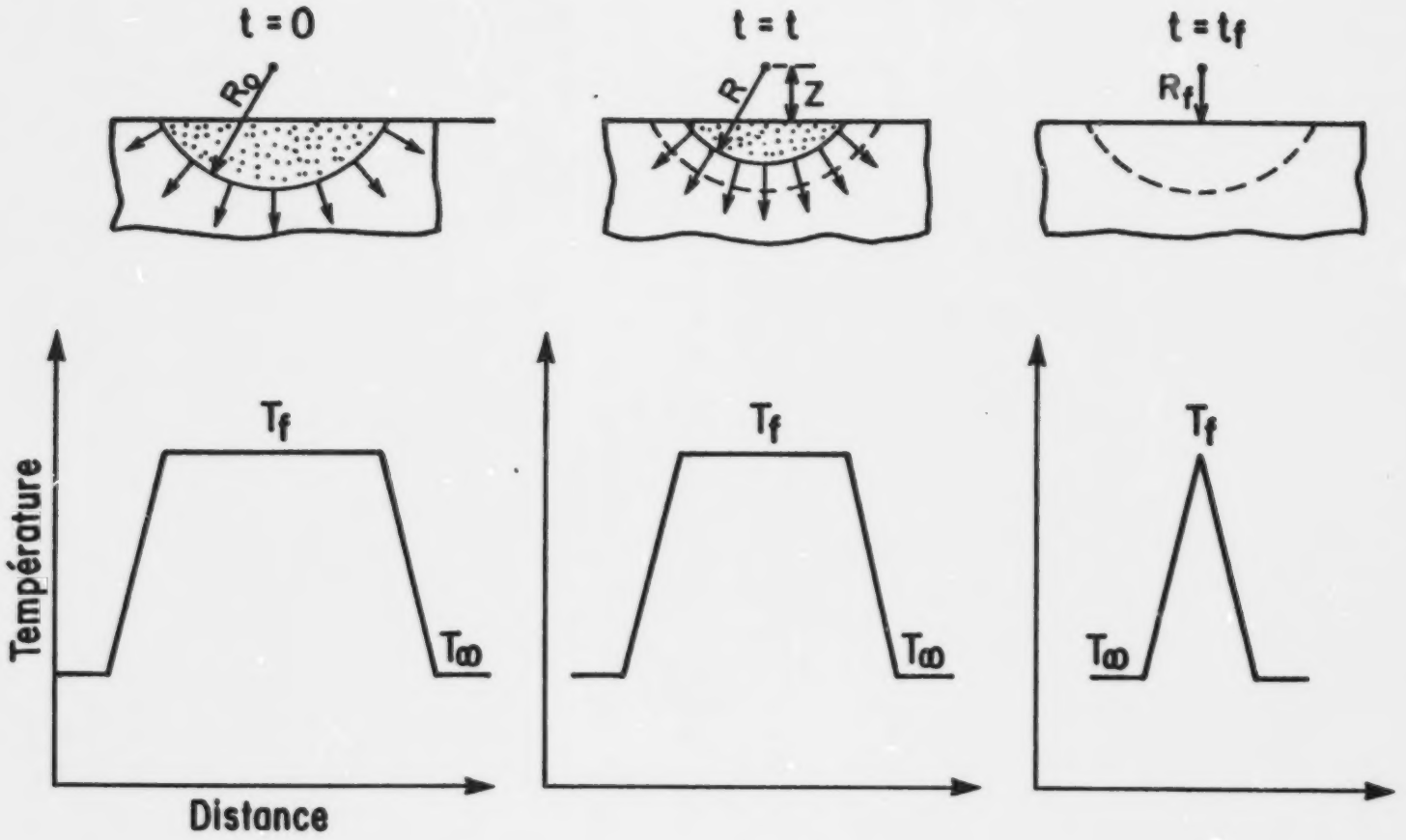


Figure 1: Modèle de solidification

$$Ak_s \left(\frac{dT}{dR}\right)_s = \rho_s H_f \frac{dV}{dt}$$

où A est la surface d'interface.

V est le volume du bain de fusion.

k_s est la conductivité thermique du métal solide.

$\left(\frac{dT}{dR}\right) = G_0$ est le gradient thermique dans la phase solide à l'interface.

ρ_s est la masse volumique.

H_f est la chaleur de fusion du métal.

Pour une portion de sphère $dV = AdR$, d'où:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{k_s G_0}{\rho_s H_f}$$

Pendant la solidification, l'interface demeure perpendiculaire au flux thermique donc la progression du front de solidification peut être simulée par la décroissance du rayon de la sphère de R_0 à R_f tel que schématisé à la figure 1. L'intégration entre $t = 0$ et $t = t_f$ donne:

$$D = t_f \times \frac{k_s G_0}{\rho_s H_f}$$

où $D = R_0 - R_f$ est la pénétration.

On peut encore écrire plus simplement:

$$D = \frac{t_f G_0}{K_G}$$

La profondeur de pénétration est proportionnelle au temps de solidification et au gradient thermique à l'interface. $1/K_G$ est le facteur de proportionnalité.

Pour connaître D il faut donc mesurer le profil thermique transversal du bain et le temps de solidification. Cette technique nécessite

l'utilisation d'au moins deux capteurs infrarouges, l'un qui balaye transversalement le bain pour mesurer les gradients et l'autre, fixe, pointé vers le centre du bain pour enregistrer la courbe de refroidissement et calculer le temps de solidification.

2.2 Méthode utilisant le temps de solidification et la vitesse de refroidissement après solidification

La technique que nous venons de décrire requiert l'utilisation de deux capteurs. Il est toutefois possible de se restreindre à un seul capteur, fixe, en poursuivant l'analyse de la courbe de refroidissement après solidification. En effet la vitesse de refroidissement après solidification est également représentative de la vitesse de diffusion thermique et il doit être possible de trouver une relation entre la vitesse de refroidissement et les gradients thermiques latéraux.

En fin de solidification, pour des plaques de faible épaisseur, la température s'est homogénéisée à travers toute l'épaisseur et on peut supposer que l'écoulement thermique est bidimensionnel avec une symétrie radiale.

L'équation différentielle s'écrit alors:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$$

On cherche la solution T (r,t) de cette équation pour les conditions limites suivantes:

$$T\ (0,0) = T_f$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}\ (0,0) = - G_0$$

$$T\ (R,0) = T_\infty$$

où R est le rayon à partir duquel le gradient thermique devient négligeable ($T = T_\infty$)

La solution est de la forme:

$$T - T_\infty = \exp(\lambda^2 \alpha t)[C_1 \cos\lambda r + C_2 \sin \lambda r]$$

Les constantes C_1 et C_2 sont déterminées en appliquent les deux premières conditions limites:

$$T - T_\infty = \exp(-\lambda^2 \alpha t)[(T - T_\infty)\cos\lambda r - \frac{G_0}{\lambda} \sin\lambda r]$$

Pour déterminer λ il faut utiliser la troisième condition limite:

$$(T_f - T_\infty) \cos \lambda R - \frac{G_0}{\lambda} \sin\lambda R = 0$$

soit:

$$\operatorname{tg} \lambda R = \lambda \frac{T_f - T_\infty}{G_0}$$

On pose $R = k \cdot \frac{T_f - T_\infty}{G_0}$ et $X = \lambda \cdot \frac{T_f - T_\infty}{G_0}$

$$\operatorname{tg} kX = X$$

Cette équation a une infinité de solutions soit X_n une de ces solutions:

$$\lambda = X_n \frac{G_0}{T_f - T_\infty}$$

La vitesse de refroidissement juste après solidification s'écrit:

$$C_r = -\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{(0,0)} = \lambda^2 \alpha (T - T_\infty)$$

$$C_r = \frac{X_n^2 \, G_0^2 \, \alpha}{T_f - T_\infty}$$

On peut alors exprimer G_0 en fonction de C_r:

$$G_0 = \frac{1}{X_n}\sqrt{\frac{(T_f - T_\infty)\, C_r}{\alpha}}$$

Il suffit alors de remplacer G_0 dans l'équation du premier modèle pour trouver la relation entre D et C_r:

$$D = \frac{t_f}{X_n H_f}\sqrt{(T_f - T_\infty)\, \alpha\, C_r}$$

ou encore $D = K_s\, t_f \sqrt{C_r}$

Selon cette équation la profondeur de pénétration peut être calculée directement à partir du seul enregistrement de la courbe de refroidissement du bain de fusion après extinction de l'arc ce qui ne nécessite qu'un seul capteur orienté vers le centre du bain. Le facteur de proportionnalité K_s doit être déterminé expérimentalement. De nombreuses approximations ont été faites pour obtenir cette formule et seule une vérification expérimentale permettra de déterminer son domaine de validité.

3. LES CAPTEURS INFRAROUGES À FIBRE OPTIQUE

Les mesures d'émission infrarouges du bain doivent être réalisées au moyen de capteurs possédant un temps de réponse aussi bas que possible et capables de discriminer les radiations du bain de fusion et celles de l'arc.

Nous avons utilisé au cours de nos essais deux systèmes infrarouges: le pyromètre Vanzetti (pyro 1) et le pyromètre Raytek Thermalert (pyro 2). Tous deux fonctionnaient avec une cellule de sulfure de plomb et un filtre à bande passante de 2 à 2,3 μ.

À cette longueur d'onde, la puissance émissive par unité de surface à la température du bain de fusion (1500°C) est proportionnelle à $T^{3,6}$. On montre également qu'au-dessus de 2 μ la puissance émissive du bain domine celle de l'arc ce qui limite la pollution du signal par l'arc.

Le système Vanzetti a un meilleur temps de réponse (30 ms pour 90% du signal) que le pyromètre Thermalert (100 ms pour 90% du signal). De plus son capteur à fibre optique permet un champ de mesure de 0,5 mm de diamètre comparé à 1 mm pour le capteur à fibre optique construit à l'IREQ et connecté au pyromètre Thermalert. Ces différences sont illustrées par les courbes de la figure 2 où les deux systèmes infrarouges ont enregistré simultanément la courbe de refroidissement au centre d'un bain de fusion dans un acier au carbone. Les deux pyromètres n'ont pas tout à fait la même calibration ce qui explique que les courbes ne se superposent pas. Toutefois on peut vérifier notamment juste après extinction de l'arc que le pyromètre Vanzetti a un meilleur temps de réponse.

Les deux pyromètres ont été calibrés sur une bande d'acier inoxydable chauffée par effet Joule et dont la surface avait été oxydée pour que son émissivité soit très proche de l'unité. La relation entre la température et la tension de sortie du pyromètre a ainsi été établie:

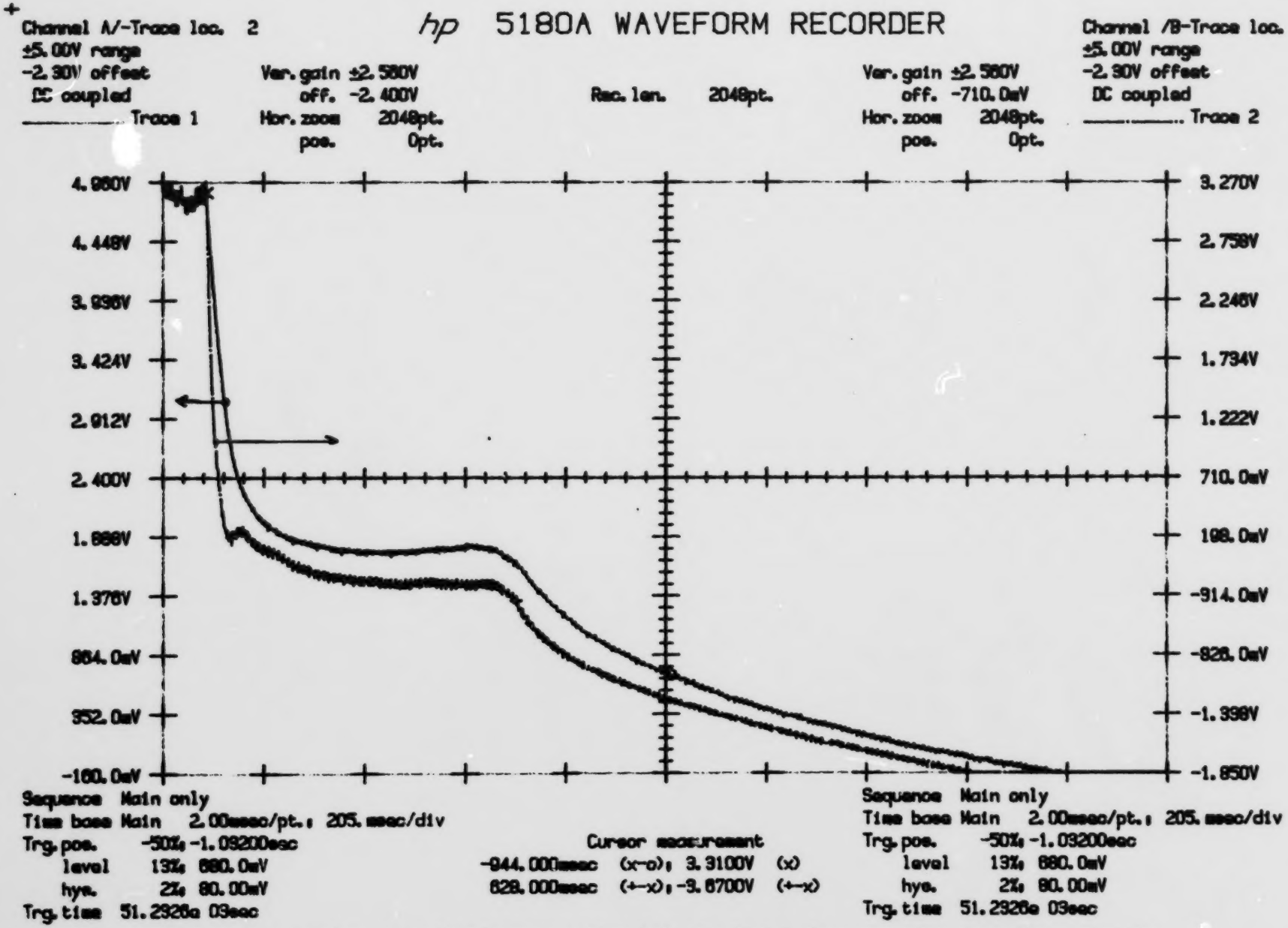


Figure 2: Courbes de refroidissement d'un bain de fusion dans un acier au carbone enregistrées simultanément par le pyro 1 (courbe inférieure et le pyro 2 (courbe supérieure)

pyro 1: $T1 = 188\ V + 663$

Pyro 2: $T2 = 196\ V + 315$

Ces relations sont évidemment fonction de l'émissivité de surface et il faut en tenir compte lors des mesures. Cette correction pourra toutefois être faite automatiquement lors de la mesure du palier de solidification. En effet, le palier de solidification correspond à la température de fusion; si V_f est la tension de sortie du pyromètre au niveau du palier la température corrigée s'exprime:

$$T = \frac{AV + B}{AV_f + B} \cdot T_f$$

et l'émissivité corrigée:

$$\varepsilon = \left(\frac{AV_f + B}{T_f}\right)^{3,6}$$

La figure 3 montre un profil obtenu lors d'un balayage transversal de la bande d'acier à 1160°C, la vitesse du vérin était de 52 mm/s, cette vitesse reste constante à ± 5% sur une distance de 20 mm largement supérieure à la largeur de la bande d'acier (6 mm). Pour cet essai nous avons utilisé le pyromètre n° 1; on constate que la pente de la courbe est plus abrupte à gauche qu'à droite. Si v est la vitesse de balayage et d le diamètre du spot, la durée minimale de la transition est $\frac{d}{v}$ soit dans le cas présent avec v = 52 mm/s et d = 0,5 mm, une transition de 9,6 ms. Cette transition devrait produire un gradient thermique apparent de 1426°C/mm. En fait on mesure à gauche un gradient de 972°C/mm et à droite 508°C/mm. On est donc limité par le temps de réponse du pyromètre et ce temps de réponse est manifestement plus faible sur un front montant que sur un front descendant.

Dans nos expériences nous travaillerons avec une vitesse de balayage plus faible (36 mm/s) pour minimiser cette dissymétrie, mais nous observerons néanmoins une différence de 20 à 30% entre le gradient gauche et le gradient droit.

vitesse balayage = 52 mm/s

largeur bande inox = 6 mm

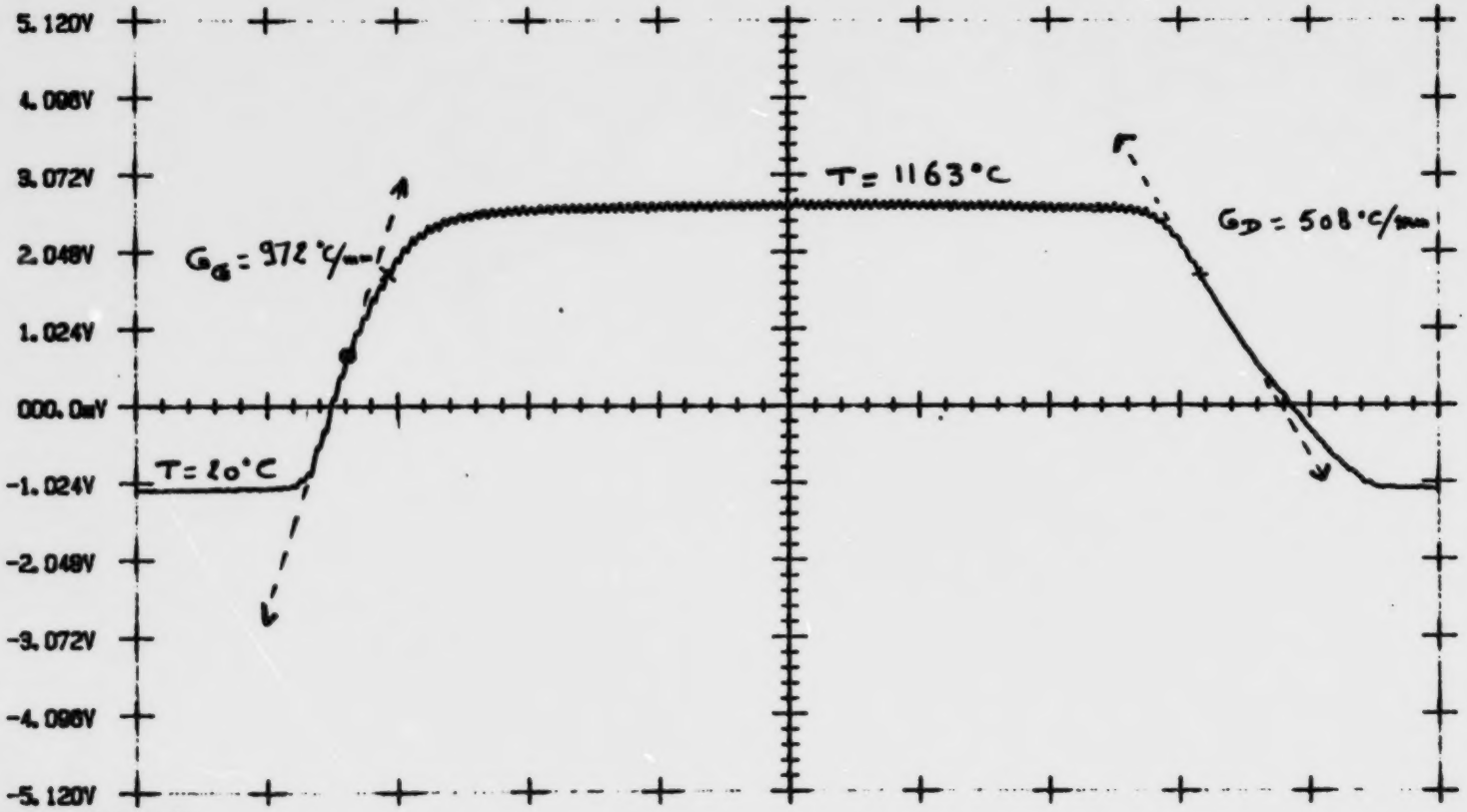
Channel A-Trace loc. 1
±5.00V range
000.mV offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

calibration: T = 188V+663

Ver.gain ±5.120V
off. 000.0mV
Hor.zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec.len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 200.usec/pt.: 20.5msec/div
Trg.pos. -16%:-33.2000msec
level 12%: 610.0mV
hys. 1%: 40.00mV
Trg.time 82.3277e 03sec

Cursor measurement
8.20000msec (x-o): 1.7500V (x)
127.600msec (←x): -10.000mV (←x)

Figure 3: Profil thermique obtenu avec le pyro 1 lors du balayage transversal d'une bande d'acier inoxydable chauffée à 1163 °C

4. DÉVELOPPEMENT DES ALGORITHMES DE MESURE SUR MINIORDINATEUR HP 9826

4.1 Programmes d'acquisition

L'acquisition des profils thermiques et des courbes de refroidissement se fait sur l'oscilloscope à mémoire digitale HP 5180A. Cet oscilloscope a une mémoire de 16K qui peut être ségmentée en un maximum de 32 blocs (512 points par bloc). On peut donc enregistrer jusqu'à 32 formes d'onde consécutives. Ces formes d'onde sont ensuite mémorisées sur disquette avec une fiche descriptive de l'expérience.

4.2 Mesure du temps de solidification et de la vitesse de refroidissement après solidification

Les courbes des figures 4 à 8 sont des exemples d'essais de solidification d'un bain de fusion. La température enregistrée est celle du centre du bain. Ces courbes ont été filtrées par le miniordinateur HP 9826. On constate que le plateau de solidification comporte parfois des irrégularités dues à des variations brusques d'émissivité à la surface du métal liquide (passage d'une particule d'oxyde par exemple). De plus, la position du plateau varie légèrement d'un essai à l'autre car l'émissivité change. Nous devons donc trouver une méthode de détermination du temps de solidification qui tienne compte de ces considérations et soit facilement implantable sur microordinateur.

En s'inspirant du processus suivi par le cerveau humain pour déterminer le point de solidification, on remarque que c'est la forme particulière de la courbe juste après la fin de la solidification qui nous fournit la meilleure balise. Nous avons tiré profit de cette observation pour mettre au point la méthode suivante:

Le temps de solidification est défini comme le temps à partir duquel aucune convexité n'est détectée sur la courbe de refroidissement.

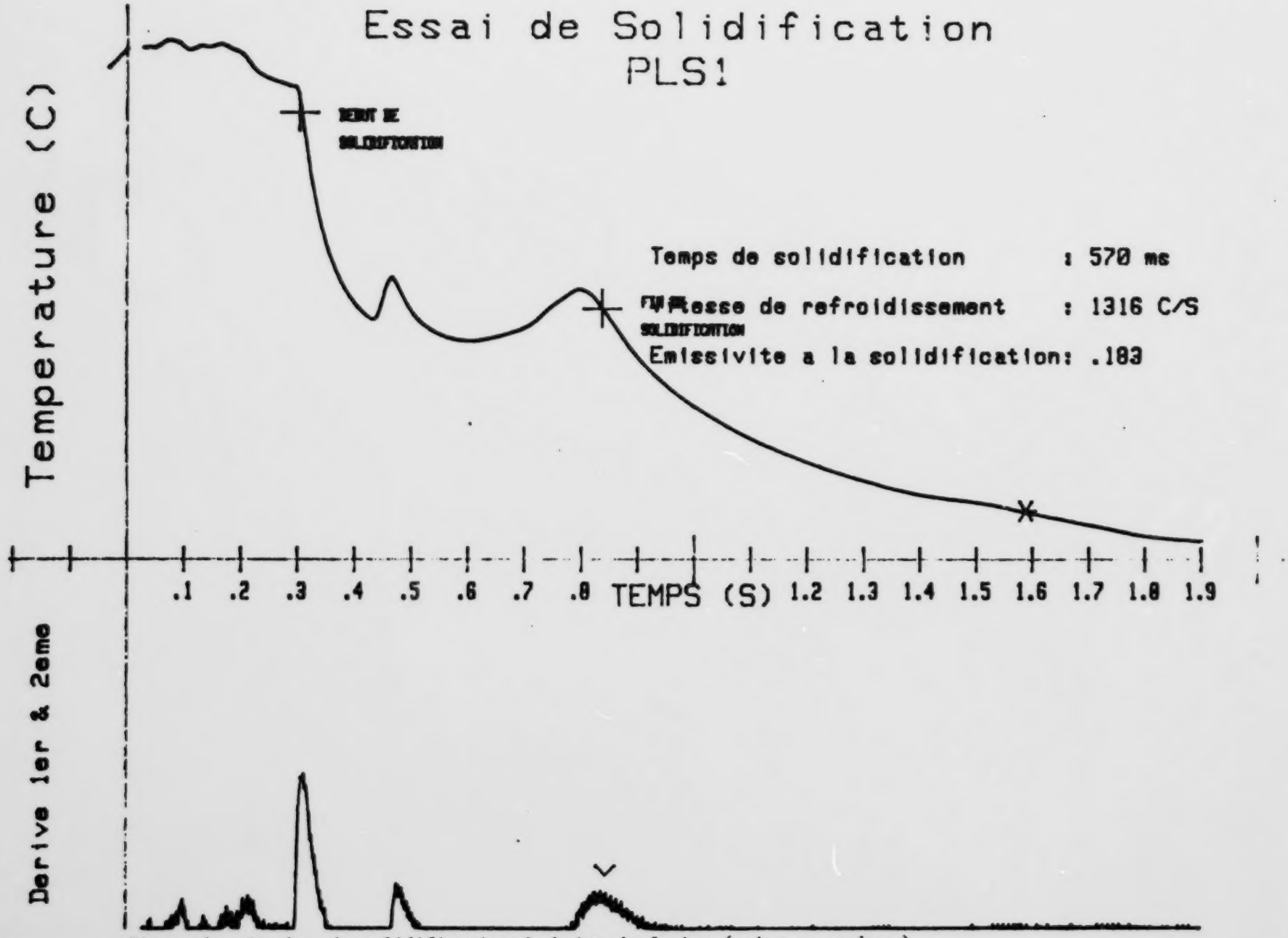


Figure 4: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

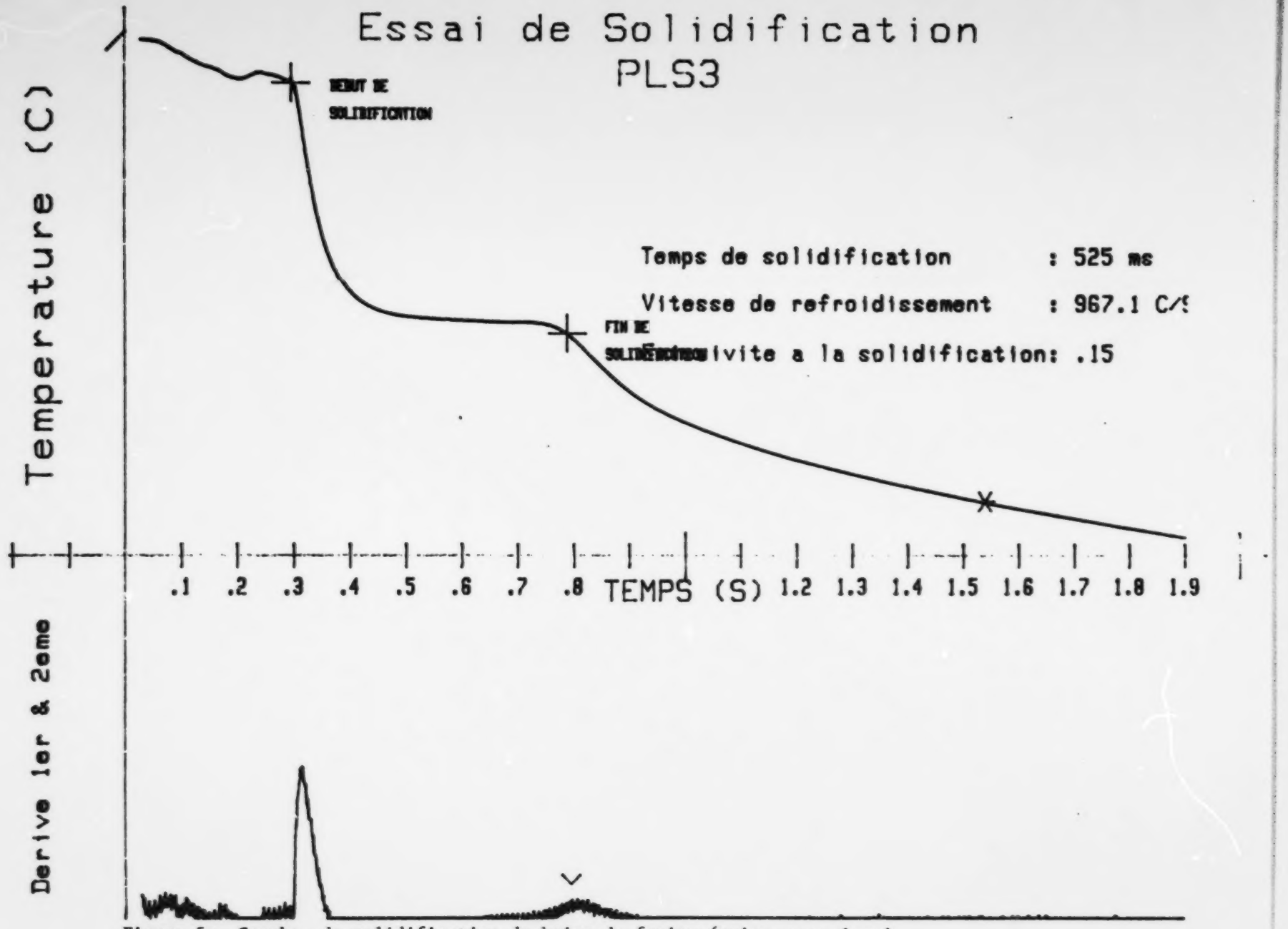


Figure 5: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

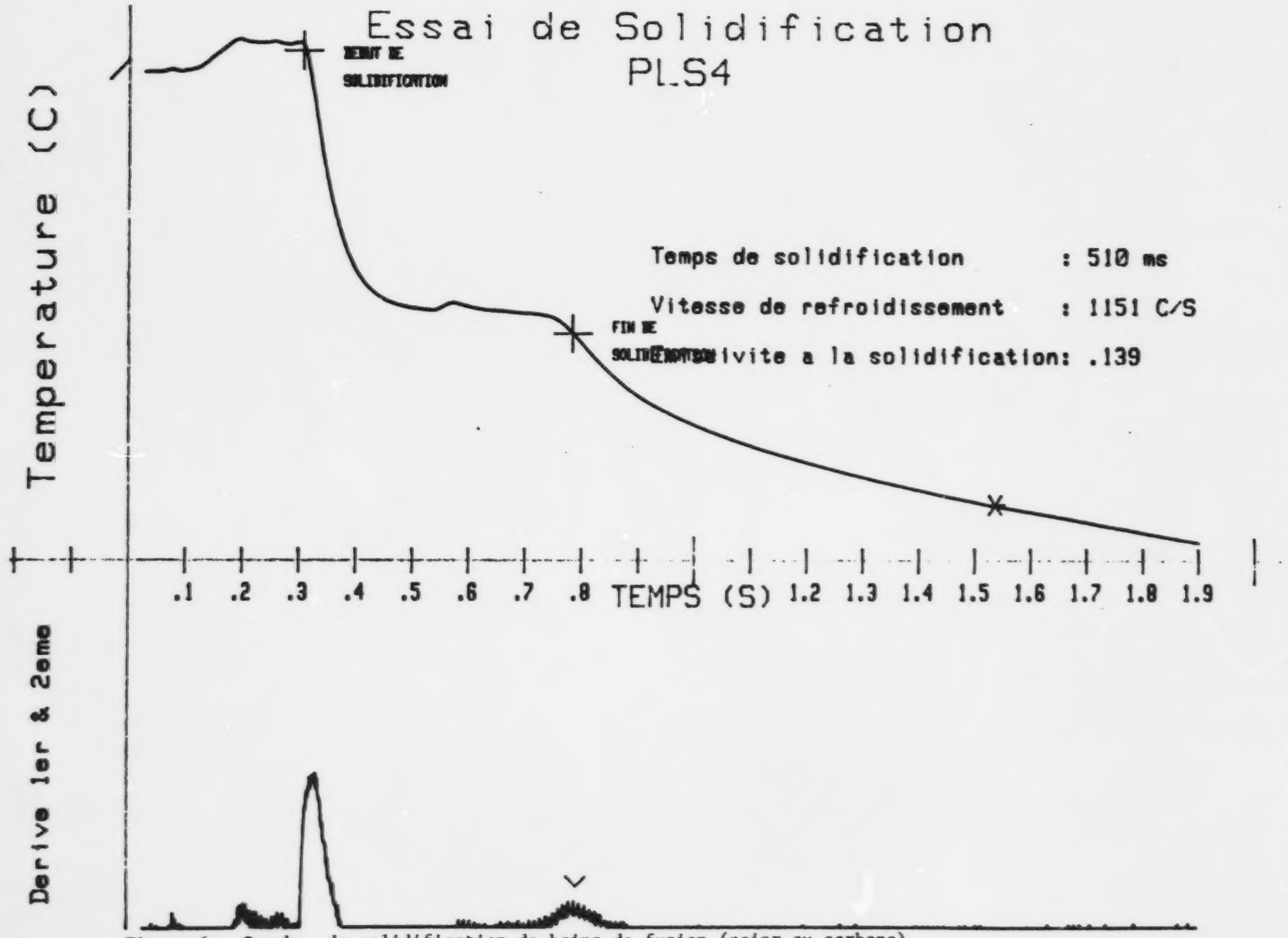


Figure 6: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

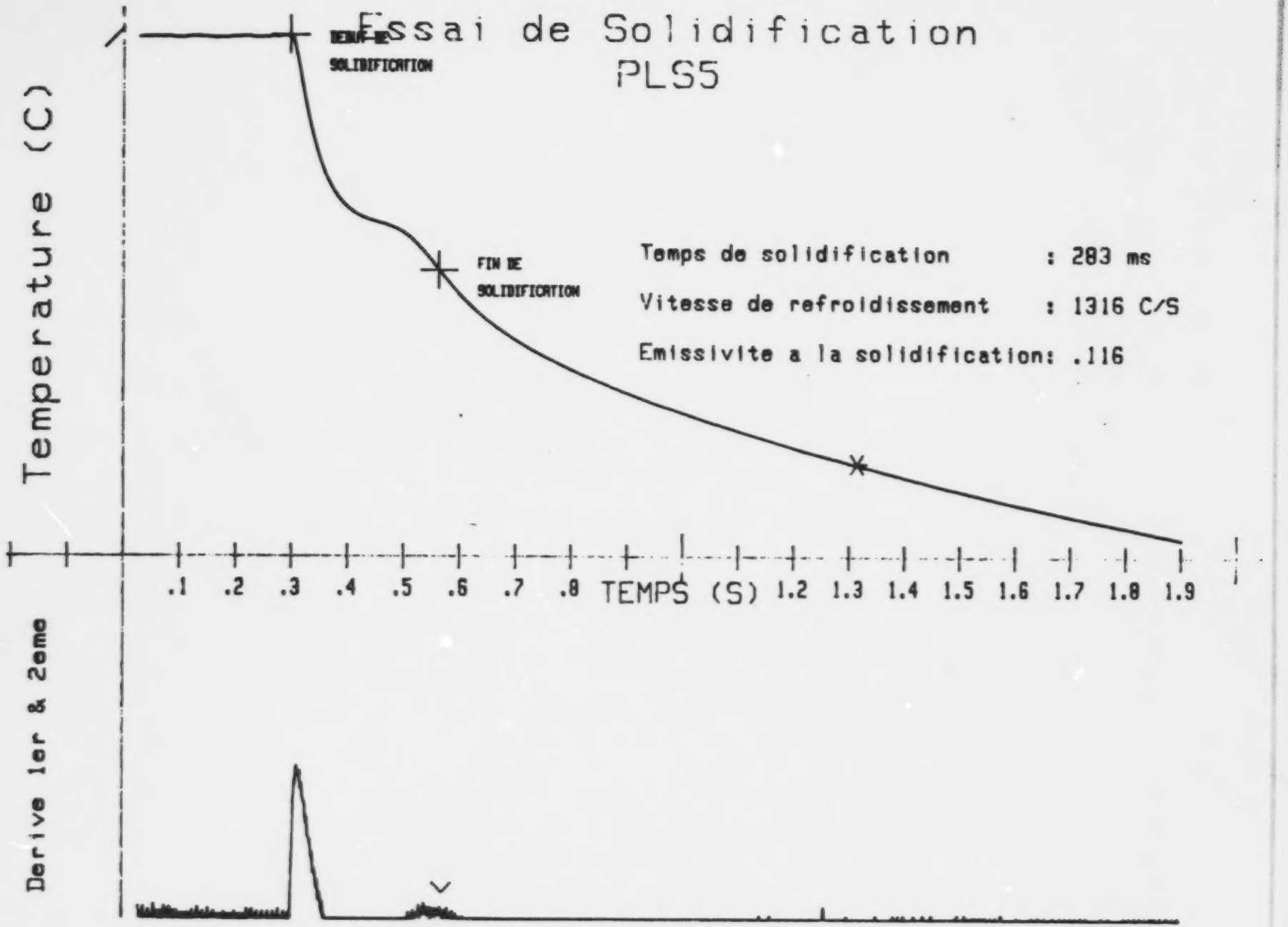


Figure 7: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

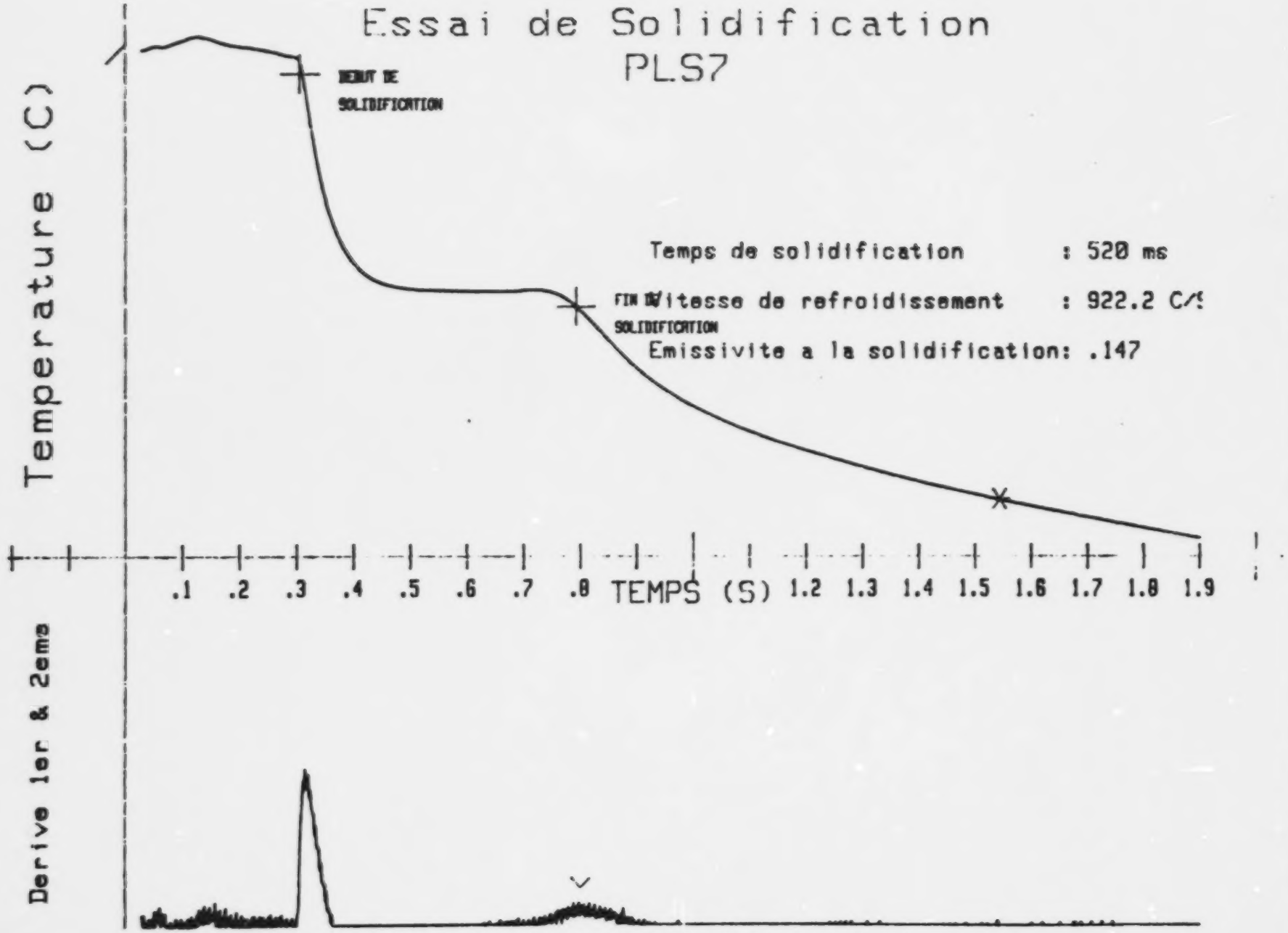


Figure 8: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

En effet, le processus de refroidissement de la phase solide est exempt de toutes convexités dans sa caractéristique température vs temps. Une façon de détecter les convexités est d'effectuer la dérivée seconde du signal de température. Après conditionnement il est possible de détecter adéquatement les convexités, et par le fait même, le temps de solidification.

La vitesse de refroidissement est mesurée en effectuant une régression linéaire continue de la courbe de solidification sur des segments de durée déterminée. La vitesse de refroidissement est définie comme la pente la plus élevée des segments ultérieurs au point de solidification. Notons que le pyromètre est recalibré automatiquement pour cette mesure à partir de la tension de sortie du pyromètre correspondant au point de solidification. De cette façon, la mesure de la vitesse de refroidissement est rendue insensible aux variations d'émissivité.

4.3 Mesure de la largeur du bain et des gradients latéraux

Les figures 9 à 13 montrent le profil transversal d'un bain de fusion lors de la croissance d'un bain stationnaire GTAW sans métal d'apport dans une plaque mince (1,5 mm) d'acier inoxydable. Le courant de soudage était constant à 60 A. Nous avons utilisé pour ces expériences le pyromètre 1. La vitese de balayage était de 36 mm/s. Dès que le bain est bien formé, on voit apparaître trois pics principaux dans le profil, le pic central correspond à l'addition de l'émission infrarouge du bain et de l'arc, tandis que les deux pics latéraux sont dus à des transitions d'émissivité brusque aux limites du bain. L'oxydation du métal et la formation de dépôts de poudre métalisée contribuent à l'augmentation de l'émissivité au bord du bain.

À la longueur d'onde de détection que nous avons utilisé (2, 3 μ) l'interférence de l'arc (ou de la tâche anodique) est minimisée mais reste évidente notamment par les différences de niveau des transitions de part et d'autre du bain suivant la position de l'arc.

$G_G = 378$ °C/mm
$G_D = 564$ °C/mm
$W = 0.9$ mm

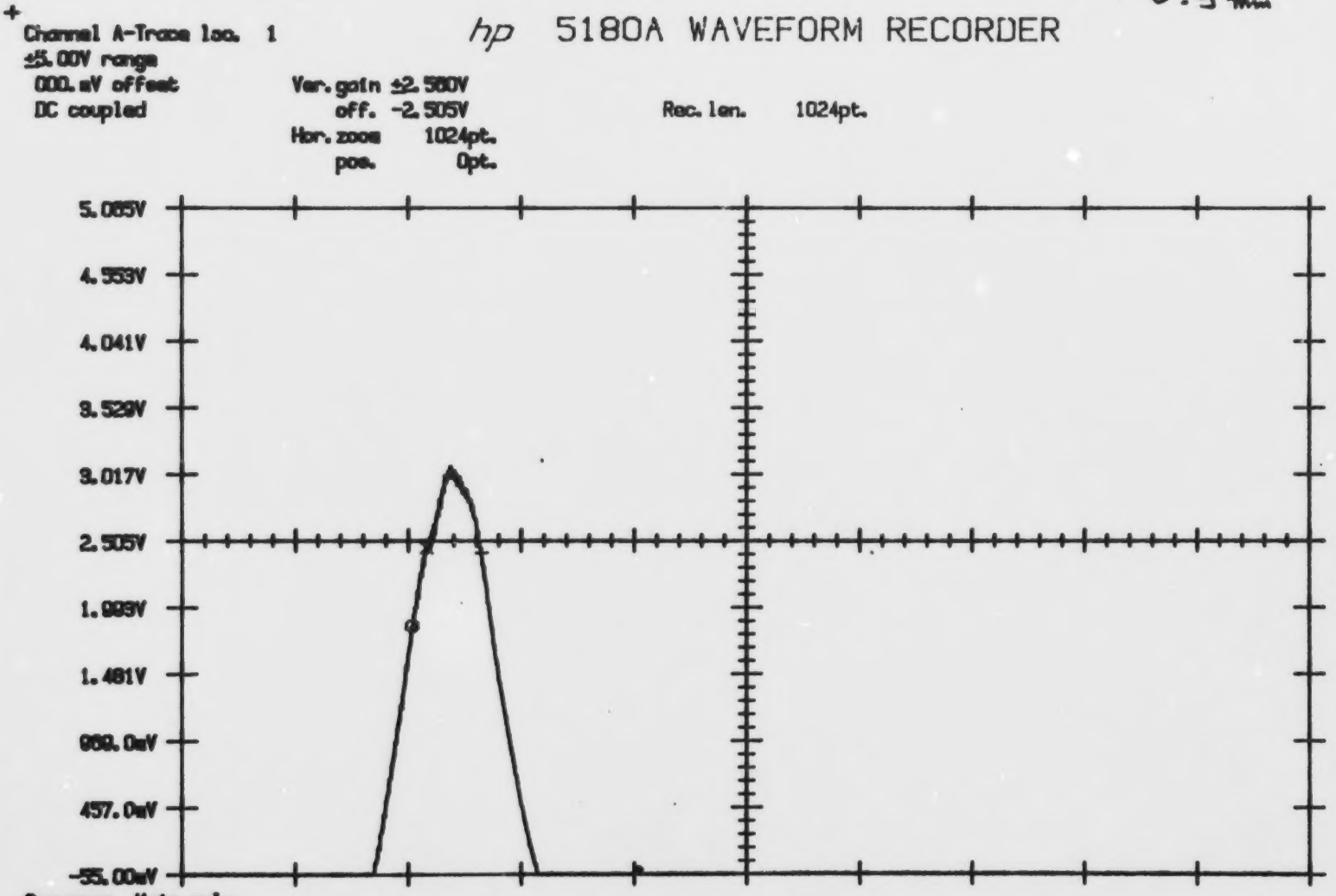


Figure 9: Profil thermique transversal d'un bain de fusion dans une plaque mince d'acier inoxydable. Temps d'arc: 2 s

$G_e = 320\ °C/mm$
$G_D = 223\ °C/mm$
$W = 5.8\ mm$

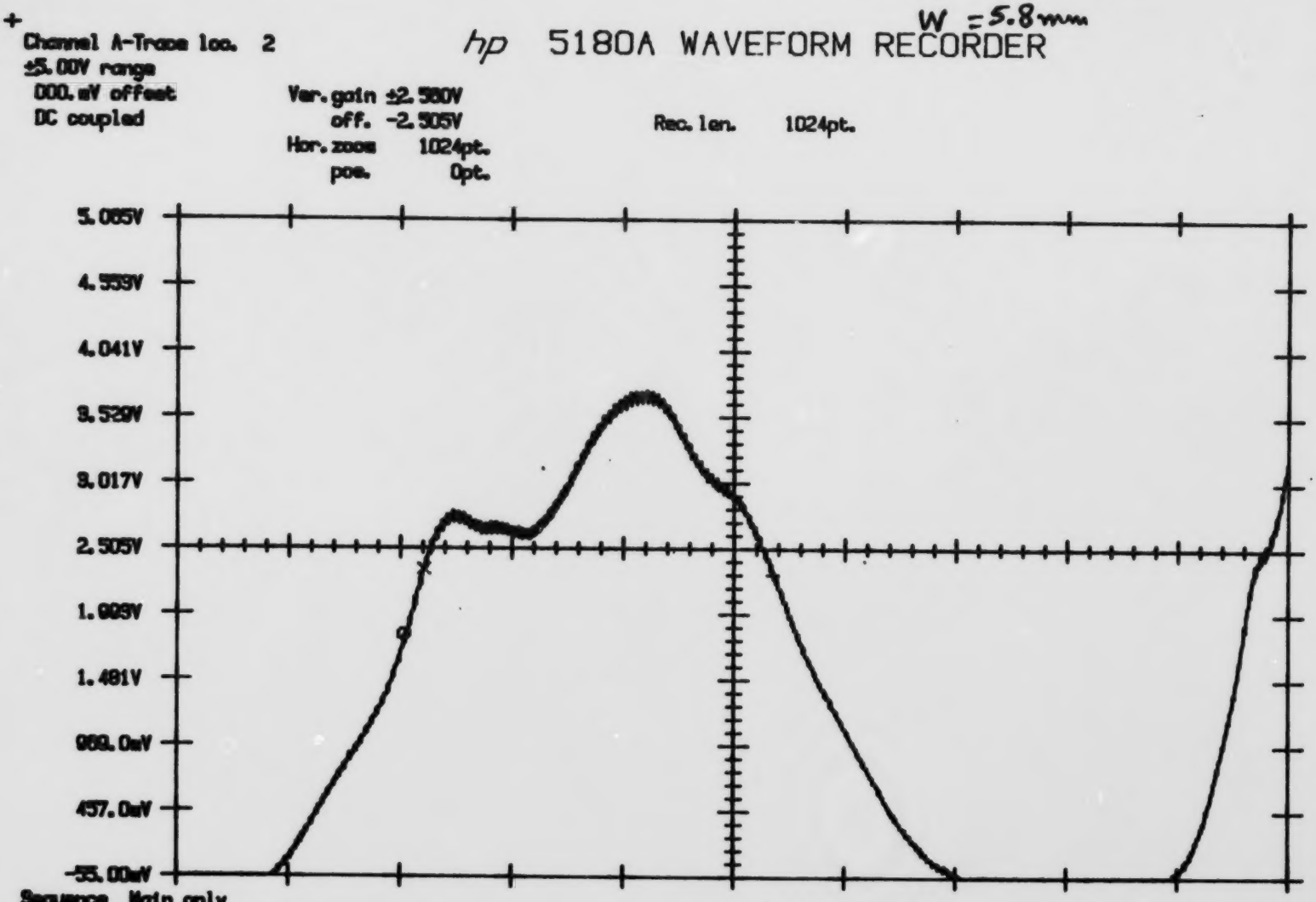


Figure 10: Temps d'arc: 3 s

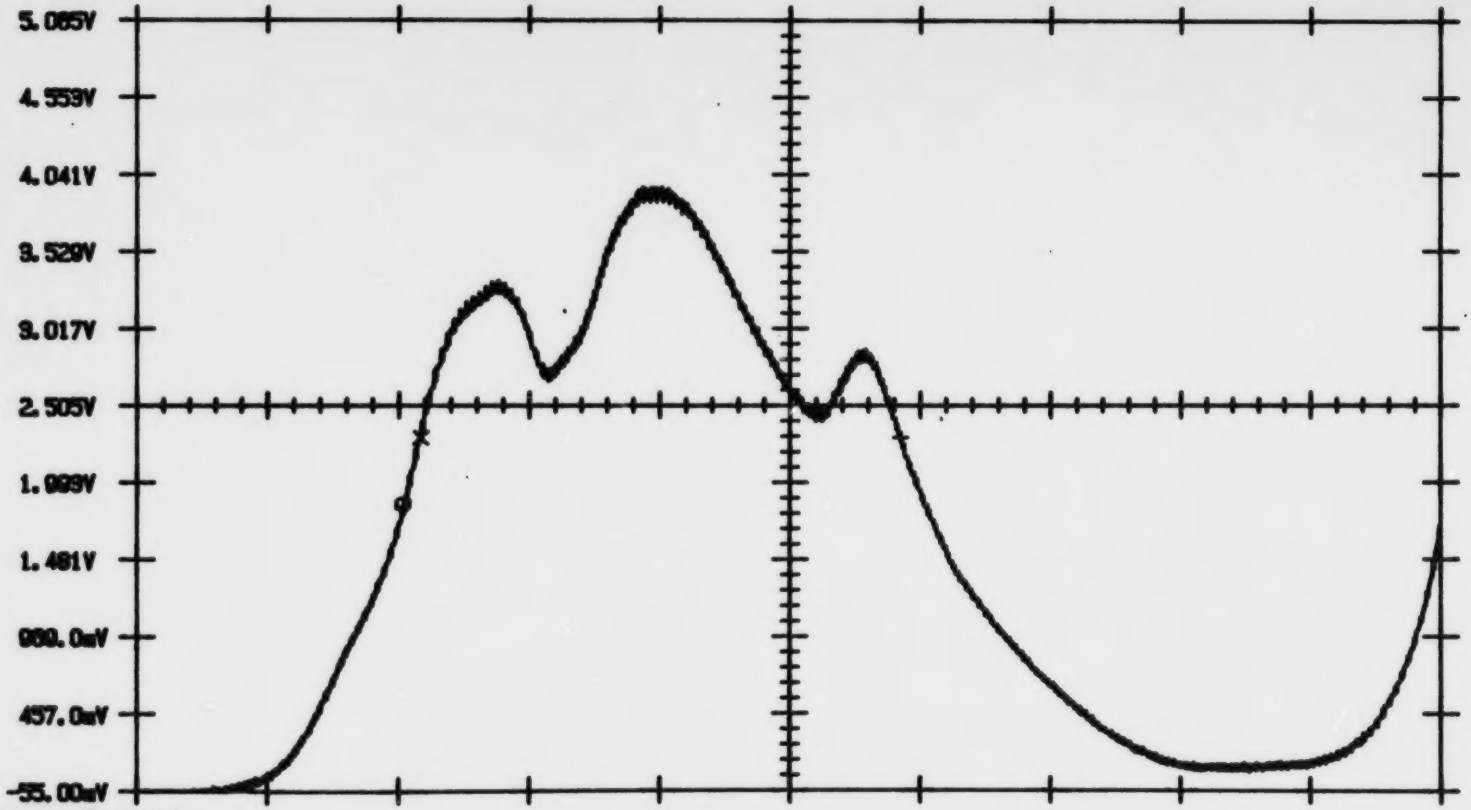
G_c = 541 °C/mm
G_D = 229 °C/mm
W = 6.8 mm

Channel A-Trace loc. 8
±5.00V range
000.mV offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Ver.gain ±2.560V
off. -2.505V
Hor.zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec.len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 500.usec/pt.: 51.2msec/div
Trg.pos. -20% -104.000msec
level 96% 1.820V
hys. 1% 40.00mV
Trg.time 516.532m 03sec

Cursor measurement
7.00000msec (x-o): 2.2800V (x)
188.000msec (←x): 10.000mV (←x)

Figure 11: Temps d'arc: 4 s

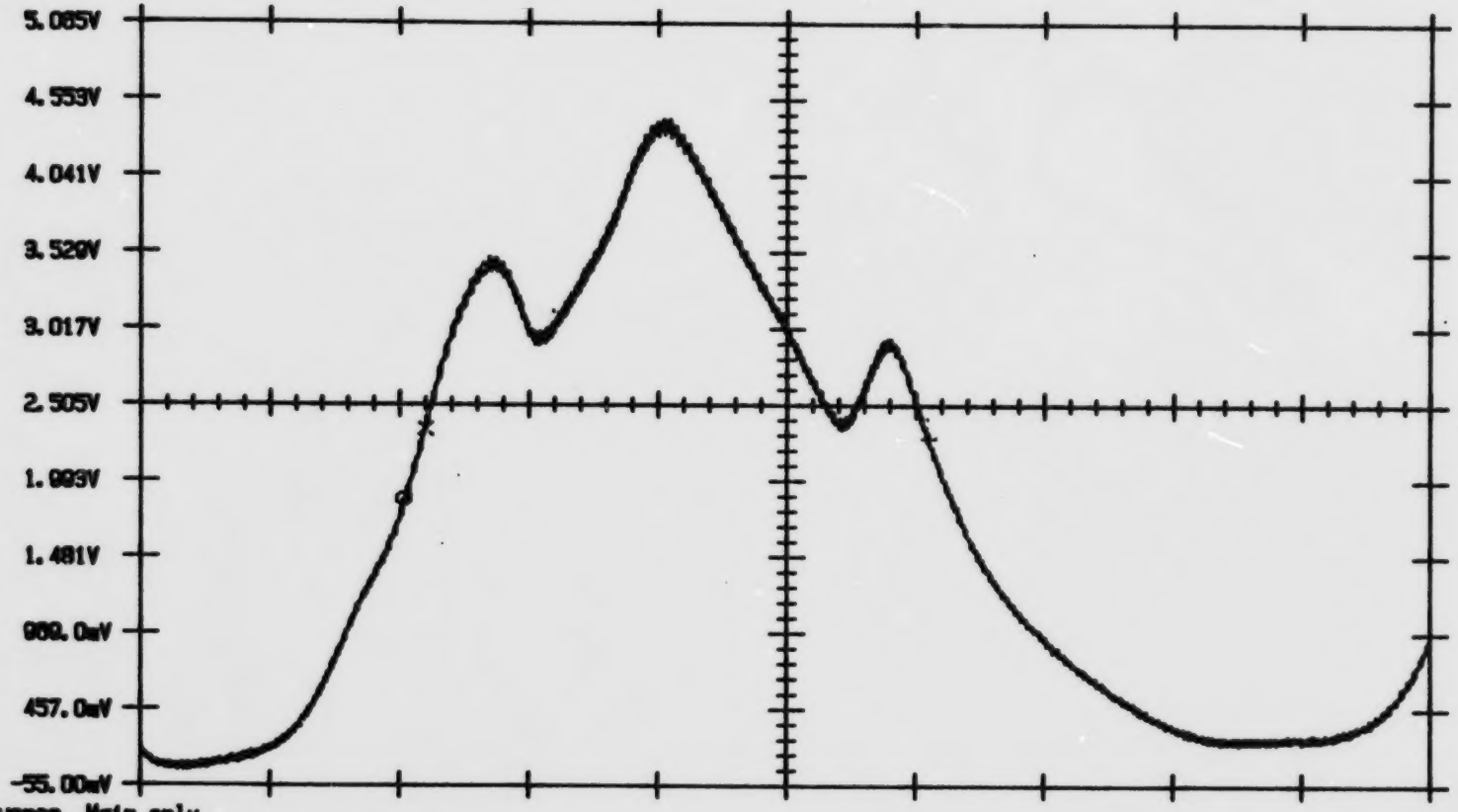
$G_c = 363$ °C/mm
$G_d = 255$ °C/mm
$W = 7.2$ mm

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Channel A-Trace loc. 4
±5.00V range
000.mV offset
DC coupled

Ver. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 500.usec/pt.: 51.2msec/div
Trg.pos. -20%: -104.000msec
level 96%: 1.820V
hys. 1%: 40.00mV
Trg.time 516.593m 03sec

Cursor measurement
8.50000msec (x-o): 2.3300V (x)
199.500msec (+-x): -50.000mV (+-x)

Figure 12: Temps d'arc: 5 s

$G_G = 360$ °C/mm

$G_D = 320$ °C/mm

$W = 7.5$ mm

(5)

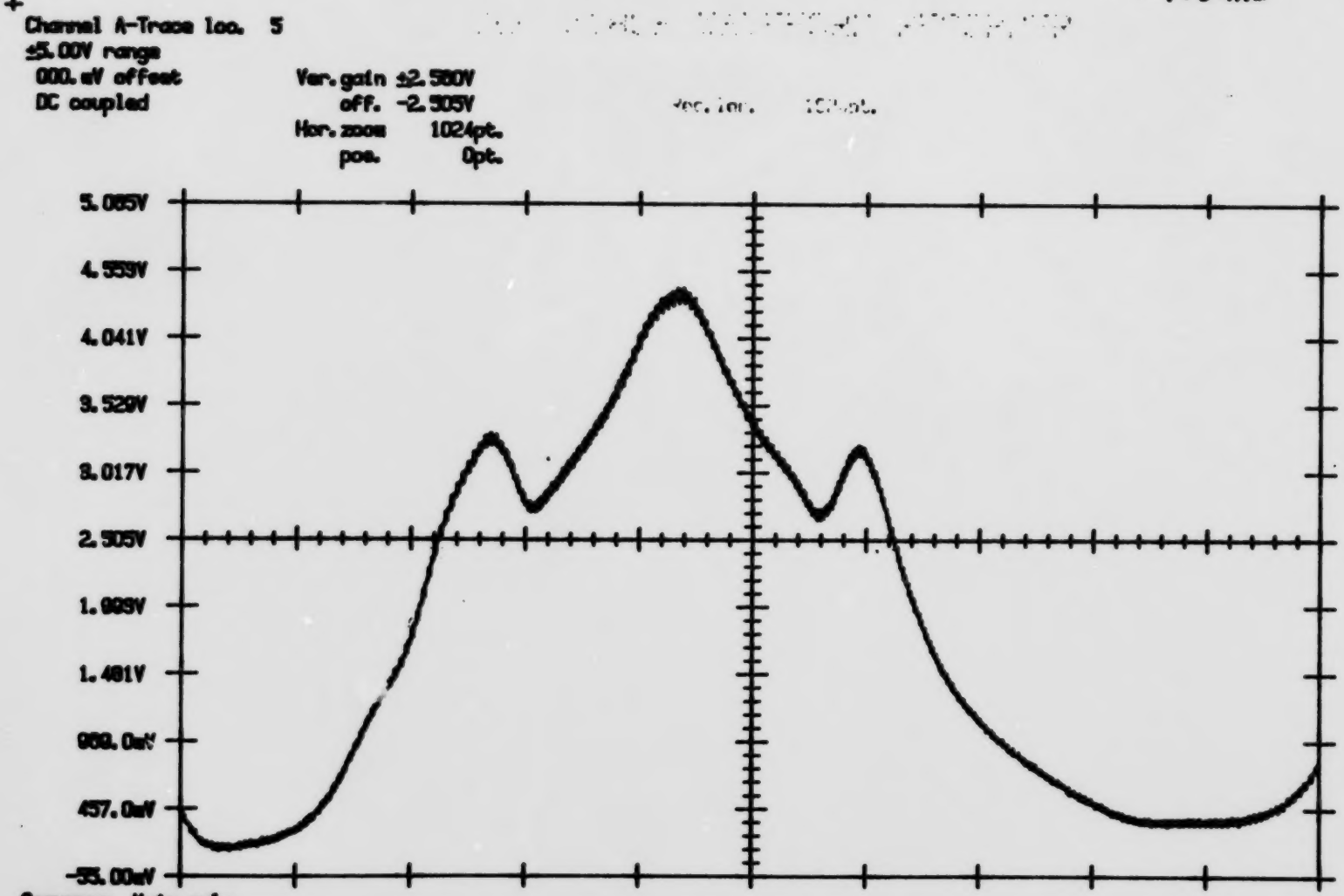


Figure 13: Temps d'arc: 7 s

Les gradients thermiques latéraux sont définis comme les gradients maximum (en valeur absolue) observés sur ces profils. Il faut noter ici qu'il est impossible de mesurer exactement ces gradients car les pentes sont fonction d'une part de la valeur absolue du gradient thermique et d'autre part des variations d'émissivité dans le métal. De plus, on constate toujours que la valeur du gradient droit reste systématiquement inférieure à celle du gradient gauche même si la vitesse de balayage a été réduite à 36 mm/s.

Pour mesurer la largeur du bain de fusion nous avons essayé deux méthodes:

- Le seuil

Une façon simple est de mesurer sur le profil la distance entre l'intersection gauche et droite d'une droite coupant le profil à une température fixe (seuil). Nous commettons alors une erreur systématique dont il faudra tenir compte dans la calibration.

- La détection des pics latéraux

Une deuxième méthode consiste à tirer profit de la variation d'émissivité aux limites du bain. Les convexités sont détectées de façon analogue aux convexités des courbes de solidification.

4.4 Élaboration de la structure de données et des algorithmes de mesure

Dans cette section nous proposons une description détaillée des structures de données et des algorithmes de fonctionnement du système de caractérisation du bain de fusion.

Mais avant d'aller plus loin, rappelons que l'élaboration des différentes techniques mises de l'avant dans ce rapport ont été rendues possibles par l'utilisation d'un système d'acquisition et de traitement de

données HP 9826 et HP 5180A. En effet, le microordinateur final conçu pour opérer en temps réel est de par sa nature peu flexible, rendant ainsi la tâche de conception très ardue. Par contre, le système d'acquisition de données permet de mémoriser les données et de les soumettre à un traitement via un langage de programmation de niveau élevé. De cette façon, les corrections peuvent être apportées rapidement aux techniques expérimentées et le processus de conception s'en trouve grandement simplifié.

L'acquisition des données en provenance du pyromètre s'effectue avec une résolution de 10 bits (0-1023). Après filtration numérique elles occuperont un champ de 16 bits permettant ainsi d'obtenir une précision supérieure et d'utiliser au maximum les capacités du système (Micro processeur 8085).

4.4.1 Description des filtres numériques

Les filtres utilisés dans le système sont du type premier ordre numérique et sont obtenus selon la relation suivante:

$$V_i = V_{i-1} + \frac{V_i - V_{i-1}}{N}$$

où N est le paramètre du filtre.

L'équation précédente est la discrétisation de l'équation suivante:

$$1 - e^{-\frac{P}{\tau}} = \frac{1}{N}$$

avec τ = constante de temps
P = période d'échantillonnage

qu'on peut écrire:

$$\tau = \frac{P}{Ln\left(\frac{N}{N-1}\right)} = P\left(N - \frac{1}{2}\right)$$

Le filtre ainsi obtenu est de type passe-bas et sera utilisé pour filtrer les données en provenance du pyromètre et, plus particulièrement, la dérivée seconde de ce signal qui est très sensible au bruit.

4.4.2 Calcul de pente par régression linéaire

La technique développée dans cette section s'applique aussi bien au gradient thermique qu'à la vitesse de refroidissement.

De façon générale, nous avons le modèle linéaire suivant autour d'un point (V,t):

$$V = mt + b$$

$$\begin{bmatrix} N & \sum t_i \\ \sum t_i & \sum t_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum V_i \\ \sum t_i V_i \end{bmatrix}$$

En résolvant pour m on obtient:

$$m = \frac{\sum t_i V_i - \frac{\sum t_i V_i}{N}}{\sum t_i^2 - \frac{(\sum t_i)^2}{N}}$$

Comme nous échantillonnons à intervalle de temps fixe:

$$\sum t_i = \frac{N(N+1)}{2}$$

$$\sum t_i^2 = \frac{N(N+1)(2N+1)}{6}$$

Avec:

N le nombre de points échantillonnés

et $t_i = 0, 1, 2, 3..... N$

m peut alors s'exprimer:

$$\frac{\sum t_i V_i - (\frac{N+1}{2}) \sum V_i}{N^3 - N}$$

Nous sommes intéressés à mesurer la pente de façon continue sur toute l'étendue de la caractéristique température vs temps ou température vs distance, en minimisant le nombre d'opérations requises, pour obtenir la valeur de la pente maximale.

Comme:

$$\sum t_i V_i - (\frac{N+1}{2}) \sum V_i = \sum (t_i - \frac{N+1}{2}) V_i$$

En conservant en mémoire les N points sur lesquels s'effectue la mesure du gradient, on peut mesurer celui-ci de façon continue au moyen de l'algorithme suivant:

- $i = i + 1$
- $\sum V_i = \sum V_i - V_i - N$
- $Stat = Stat - \sum V_i + (\frac{N+1}{2}) (V_i - N + V_i)$
- $\sum V_i = \sum V_i + V_i$
- $m = \frac{12\ Stat}{N^3 - N}$

Pour simplifier le travail du microprocesseur, nous sommes intéressés à ce que toutes les variables soient représentées par un champ de 16 bits sous forme de complément deux, si possible. En choisissant N = 17 et en travaillant avec V_i, nous obtenons une structure de données et un algorithme optimals. En effet, la multiplication par $\frac{N+1}{2}$ se ramène à multiplier par 8, ce qui est très facile pour le microprocesseur, de même que diviser par 32.

4.4.3 Calcul des convexités

La convexité d'une courbe en un endroit peut être quantifiée en examinant la valeur de la dérivée seconde.

La dévivée seconde d'un signal discrétisé avec une période d'échantillonnage P est obtenue de la facon suivante:

$$\frac{d(V_i)}{dt} = \frac{V_{i+1} - V_i}{P}$$

$$\frac{d^2(V_i)}{dt^2} = \frac{(V_{i+2} - V_{i+1}) - (V_{i+1} - V_i)}{P}$$

De façon à pouvoir déterminer la courbure générale en un endroit donné, nous devons filtrer le signal de la dérivée seconde. Le paramètre du filtre numérique déterminera l'étendue des convexités qui sont quantifiées par la sortie du filtre.

Après une analyse détaillée nous arrivons au résultat suivant:

$$\frac{d^2(V_i)}{dt^2} = \frac{d^2(V_i)}{dt^2} + \frac{V_{i-1} - V_i + V_{i-1} - V_{i-2}) - \frac{d^2(V_i)}{dt^2}}{N}$$

Cette équation assure une bonne gamme dynamique au signal de la dérivée seconde et permet de varier le paramètre du filtre N sur une grande plage.

4.4.4 Résultats typiques

Pour permettre au lecteur de visualiser plus facilement les méthodes numériques décrites précédemment nous avons compilé sous forme de tableau les résultats d'un essai typique de balayage.

L'essai PL-P5-2 comporte 16 profils analysés par le miniordinateur, il s'agit d'une passe de fusion GTAW sur plaque d'acier inoxydable.

Les profils sont tracés à la figure 14 selon deux angles d'observation.

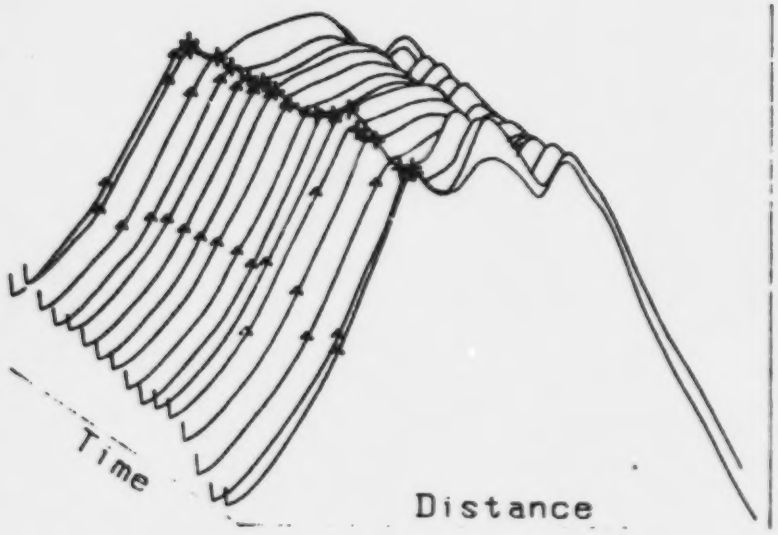
On observe que le bain de fusion était en croissance tout au long de l'expérience. Le profil de la dérivée seconde est également affiché. Les croix indiquent les points de détection des convexités et donc des limites du bain. Le tableau des valeurs (tableau 1) dans les pages suivantes indique pour chaque élément de l'un des profils (le deuxième), la valeur des paramètres importants qui y sont associés. La première colonne indique le numéro de l'élément (0-225). La deuxième colonne indique la valeur de celui-ci (tension de sortie du pyromètre), lue par le convertisseur A/D (0-1023) pour un champ de 10 bits. La troisième colonne indique la valeur de l'élément filtré (0-32767) pour un champ de 16 bits. La quatrième colonne représente la dérivée seconde conditionnée. En général pour un balayage cette valeur est contenue entre -5000 et +5000, mais occupe un champ de 16 bits. La cinquième colonne correspond à une valeur moyenne du gradient thermique à cet endroit.

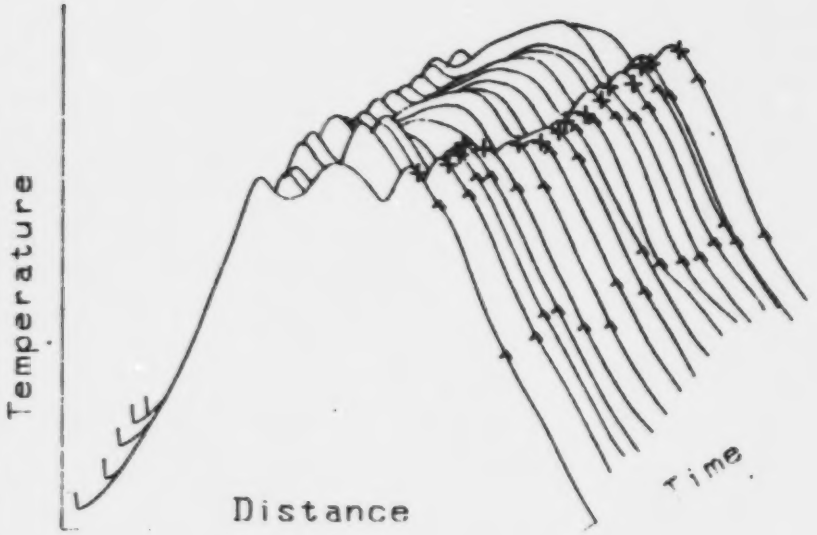
Dans un premier temps rappelons que l'élément V_i correspond au profil de puissance émissive linéarisée en température. On remarque tout de suite l'effet de lissage obtenu par le filtre (3^e colonne).

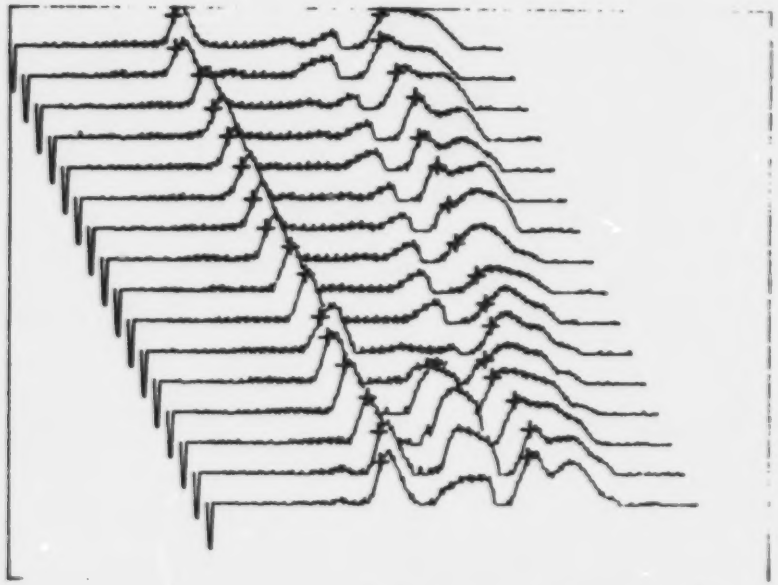
À partir du signal de la dérivée seconde conditionnée il nous est possible de détecter la présence de convexités sur les caractéristiques T(t) ou T(distance). Or vu la nature particulièrement bruyante du signal de la dérivée seconde nous avons besoin d'un algorithme de détection, qui ne détecte que les convexités d'une certaine importance et dont on puisse varier les critères de détection. L'algorithme est le suivant:

Une convexité sera détectée lorsque la dérivée seconde conditionnée atteindra une valeur supérieure à un seuil (CVX-SEUIL) pour une durée supérieure à un temps donné (MINLGDS). La convexité est détectée à l'endroit où la dérivée seconde conditionnée passe par une valeur maximale.

Test #: PL_P5_2







SWEEP #	POOL (mm) WIDTH	THERMAL GRADIENT (C/mm) LEFT	RIGHT
1	5.65	175	161
2	5.8	165	147
3	5.65	155	142
4	5.65	153	137
5	6.02	141	138
6	6.53	142	139
7	6.9	151	134
8	7.12	145	136
9	7.27	141	124
10	7.49	147	155
11	7.49	139	156
12	7.27	131	147
13	7.71	138	145
14	7.49	135	143
15	7.78	127	151
16	7.85	126	159

Figure 14: Résultats d'un essai de balayage typique

I	V_i	V_i (filtré)	$\frac{\partial^2(V)_i}{\partial t^2}$ (filtré)	STAT		Limg	Limd
	71	2271	19	0	0	0	0
	72	2275	10	566	0	0	0
	76	2279	10	1065	0	0	0
4	82	2324	-614	1497	0	0	0
5	90	2357	-602	1854	0	0	0
6	90	2409	-1204	2153	0	0	0
7	91	2459	-1098	2395	0	0	0
8	95	2517	-1404	2570	0	0	0
9	99	2582	-1663	2685	0	0	0
10	99	2641	-1384	2738	0	0	0
	107	2719	-1971	2727	0	0	0
	109	2796	-1891	2650	0	0	0
	113	2878	-2058	2513	0	0	0
	118	2968	-2345	2305	0	0	0
	119	3052	-2052	2032	0	0	0
	127	3153	-2625	1697	0	0	0
	127	3244	-2163	1279	0	0	0
	132	3342	-2408	793	0	0	0
	137	3446	-2504	869	0	0	0
	137	3540	-2142	936	0	0	0
	145	3650	-2714	991	0	0	0
	148	3752	-2332	1048	0	0	0
	150	3857	-2408	1096	0	0	0
	155	3967	-2565	1142	0	0	0
	155	4066	-2063	1176	0	0	0
	160	4181	-2638	1213	0	0	0
	162	4285	-2133	1243	0	0	0
	168	4394	-2295	1265	0	0	0
	172	4505	-2331	1286	0	0	0
29	173	4608	-1957	1305	0	0	0
30	180	4723	-2409	1321	0	0	0
	181	4830	-2033	1333	0	0	0
	187	4945	-2320	1341	0	0	0
	191	5062	-2356	1353	0	0	0
34	191	5167	-1817	1368	0	0	0
35	200	5290	-2395	1377	0	0	0
36	201	5404	-1978	1388	0	0	0
37	207	5526	-2266	1392	0	0	0
38	211	5649	-2262	1406	0	0	0
39	212	5763	-1848	1421	0	0	0
40	221	5894	-2425	1436	0	0	0
41	221	6012	-1844	1450	0	0	0
42	228	6140	-2217	1463	0	0	0
43	230	6262	-1927	1475	0	0	0
44	233	6381	-1766	1485	0	0	0
45	241	6514	-2304	1501	0	0	0
46	242	6637	-1848	1514	0	0	0
47	249	6770	-2221	1532	0	0	0
48	252	6899	-2013	1546	0	0	0
49	253	7019	-1604	1555	0	0	0
50	263	7159	-2186	1567	0	0	0
51	263	7285	-1569	1582	0	0	0
52	273	7430	-2152	1591	0	0	0
53	276	7570	-1904	1610	0	0	0
54	280	7709	-1825	1621	0	0	0
55	290	7866	-2403	1632	0	0	0
56	291	8011	-1863	1651	0	0	0
57	303	8180	-2440	1677	0	0	0
58	307	8344	-2186	1709	0	0	0
59	312	8508	-2142	1737	0	0	0

Tableau 1 Paramètres calculés par l'ordinateur pour détecter les transitions dans le profil thermique

	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1768	0	0	0
	323	8853	-2045	1805	0	0	0
	338	9049	-2519	1850	0	0	0
	339	9229	-1952	1898	0	0	0
64	345	9410	-1954	1951	0	0	0
65	358	9615	-2529	2007	0	0	0
66	358	9799	-1864	2064	0	0	0
67	374	10016	-2441	2129	0	0	0
68	376	10218	-1778	2181	0	0	0
69	382	10419	-1701	2236	0	0	0
	392	10632	-2159	2292	0	0	0
	392	10823	-1501	2347	0	0	0
	405	11037	-2085	2390	0	0	0
	403	11223	-1429	2428	0	0	0
	409	11410	-1441	2460	0	0	0
	416	11600	-1535	2485	0	0	0
	413	11752	-890	2502	0	0	0
	425	11946	-1487	2501	0	0	0
	429	12102	-843	2502	0	0	0
	426	12265	-1113	2485	0	0	0
	437	12437	-1459	2460	0	0	0
	438	12595	-856	2428	0	0	0
	456	12795	-1453	2390	0	0	0
	458	12981	-851	2355	0	0	0
4	472	13193	-1448	2323	0	0	0
	484	13423	-2033	2311	0	0	0
	487	13639	-1419	2310	0	0	0
	508	13901	-2005	2319	0	0	0
8	508	14137	-1351	2354	0	0	0
89	520	14367	-1897	2397	0	0	0
90	526	14632	-1854	2455	0	0	0
91	520	14833	-1007	2526	0	0	0
92	527	15036	-1069	2592	0	0	0
93	510	15164	-433	2653	0	0	0
94	503	15257	190	2684	0	0	0
95	491	15303	801	2687	94	0	0
96	472	15283	1399	2648	94	0	0
97	463	15236	1985	2546	94	0	0
98	441	15124	2560	2387	94	0	0
99	434	15000	3000	2153	94	0	0
100	427	14866	3350	1862	94	0	0
101	418	14717	3897	1524	94	0	0
102	424	14602	3205	1150	94	0	0
103	417	14476	3591	768	94	0	0
104	422	14379	2905	380	94	0	0
105	423	14295	2314	14	94	0	0
106	420	14210	2309	-328	94	0	0
107	431	14168	1648	-619	94	0	0
108	427	14118	1943	-849	94	0	0
109	436	14101	1290	-1018	94	0	0
110	436	14086	1182	-1119	94	0	0
111	435	14069	1240	-1155	94	0	0
112	445	14086	601	-1139	94	0	0
113	441	14089	1162	-1060	94	0	0
114	460	14152	524	-952	94	0	0
115	479	14270	-101	-800	94	0	0
116	486	14398	-509	-626	94	94	0
117	502	14565	-1113	-429	94	94	0
118	496	14696	-476	-201	94	94	0
119	512	14865	-1081	23	94	94	0
120	519	15039	-1264	260	94	94	0

Tableau 1 (suite)

[illegible]	536	15237	-1853	492	94	94	0
[illegible]	552	15468	-2430	730	94	94	0
[illegible]	545	15676	-1767	978	94	94	0
124	565	15918	-2346	1219	94	94	0
125	564	16131	-1685	1467	94	94	0
126	566	16329	-1037	1695	94	94	0
127	578	16546	-1631	1905	94	94	0
128	573	16725	-984	2101	94	94	0
129	581	16912	-1292	2251	94	94	0
130	565	17029	-652	2375	94	94	0
131	554	17099	-25	2443	94	94	0
132	540	17127	590	2453	94	94	0
133	522	17085	1193	2408	132	94	0
134	518	17034	1538	2289	132	94	0
135	504	16949	2123	2134	132	94	0
136	498	16842	2489	1914	132	94	0
137	454	16739	2521	1645	132	94	0
138	483	16611	3085	1335	132	94	0
139	486	16505	2409	993	132	94	0
140	471	16381	2975	547	132	94	0
141	474	16260	2793	291	132	94	0
142	472	16144	2532	-39	132	94	0
143	467	16005	3096	-349	132	94	0
144	465	15893	2420	-637	132	94	0
145	455	15760	2986	-884	132	94	0
146	452	15630	2803	-1097	132	94	0
147	450	15507	2460	-1258	132	94	0
148	440	15364	3025	-1375	132	94	0
149	444	15248	2350	-1458	132	94	0
150	435	15115	2917	-1510	132	94	0
151	432	14986	2695	-1553	132	94	0
152	429	14860	2518	-1576	132	94	0
153	418	14712	3082	-1594	132	94	0
154	423	14594	2406	-1614	132	94	0
155	416	14466	2767	-1518	132	94	0
156	419	14360	2097	-1623	132	94	0
157	423	14278	1441	-1629	132	94	0
158	425	14210	839	-1620	132	94	0
159	447	14219	208	-1589	132	94	0
160	452	14244	-411	-1530	132	94	0
161	473	14333	-1017	-1439	132	94	132
162	489	14465	-1611	-1313	132	94	132
163	496	14606	-1947	-1134	132	94	132
164	517	14800	-2522	-919	132	94	132
165	517	14974	-1857	-660	132	94	132
166	527	15163	-2434	-375	132	94	132
167	526	15330	-1771	-65	132	94	132
168	517	15451	-1121	260	132	94	132
169	519	15567	-894	566	132	94	132
170	505	15626	-262	854	132	94	132
171	500	15663	358	-1091	132	94	132
172	485	15649	965	1280	171	94	132
173	469	15585	1560	1400	171	94	132
174	464	15511	1938	1431	171	94	132
175	448	15394	2514	1381	171	94	132
176	444	15275	2546	1251	171	94	132
177	434	15136	3109	1052	171	94	132
178	426	14986	3497	797	171	94	132
179	427	14854	2813	492	171	94	132
180	419	14709	3289	179	171	94	132

Tableau 1 (suite)

181	423	14592	2605	-150	171	94	132
182	417	14467	2885	-452	171	94	132
183	413	14342	2827	-735	171	94	132
184	415	14236	2156	-981	171	94	132
185	405	14108	2727	-1180	171	94	132
186	406	13996	2058	-1349	171	94	132
187	396	13864	2631	-1464	171	94	132
188	388	13719	3117	-1544	171	94	132
189	385	13579	2844	-1600	171	94	132
190	374	13418	3402	-1627	171	94	132
191	374	13273	2720	-1647	171	94	132
192	362	13104	3280	-1666	171	94	132
193	355	12930	3419	-1682	171	94	132
194	352	12763	3064	-1702	171	94	132
195	339	12572	3617	-1733	171	94	132
196	337	12393	3053	-1782	171	94	132
197	325	12194	3605	-1831	171	94	132
198	318	11992	3657	-1896	171	94	132
199	314	11799	3255	-1966	171	94	132
200	304	11591	3723	-2038	171	94	132
201	303	11402	3034	-2110	171	94	132
202	294	11203	3383	-2180	171	94	132
203	290	11011	3029	-2246	171	94	132
204	286	10832	2436	-2297	171	94	132
205	280	10645	2715	-2339	171	94	132
206	282	10483	2046	-2379	171	94	132
207	273	10308	2538	-2399	171	94	132
208	270	10141	2160	-2407	171	94	132
209	266	9978	1953	-2411	171	94	132
210	258	9806	2283	-2402	171	94	132
211	257	9646	1664	-2380	171	94	132
212	248	9477	2163	-2354	171	94	132
213	244	9310	1956	-2325	171	94	132
214	240	9147	1753	-2293	171	94	132
215	233	8978	1964	-2258	171	94	132
216	232	8823	1351	-2230	171	94	132
217	227	8667	1365	-2202	171	94	132
218	225	8520	969	-2175	171	94	132
219	223	8382	581	-2142	171	94	132
220	219	8245	528	-2113	171	94	132
221	220	8125	-97	-2081	171	94	132
222	214	7997	233	-2048	171	94	171
223	212	7876	-58	-2016	222	94	171
224	208	7754	-16	-1970	222	94	171
225	203	7628	148	-1920	222	94	171
226	201	7508	-101	-1876	225	94	171
227	194	7378	311	-1831	225	94	171
228	192	7255	18	-1786	227	94	171
229	188	7137	59	-1742	227	94	171
230	182	7000	345	-1700	227	94	171
231	180	6876	51	-1670	227	94	171
232	173	6742	460	-1645	227	94	171
233	169	6609	410	-1626	227	94	171
234	164	6473	525	-1614	227	94	171
235	158	6331	760	-1610	227	94	171
236	154	6191	663	-1614	227	94	171
237	146	6039	1141	-1626	227	94	171
238	143	5893	872	-1646	227	94	171
239	138	5745	936	-1665	227	94	171
240	131	5590	1204	-1691	227	94	171

Tableau 1 (suite)

24[illegible]	126	544[illegible]	93[illegible]	-17[illegible]	22[illegible]	94	17[illegible]
242	122	5267	1120	-1738	227	94	171
243	120	5142	729	-1756	227	94	171
244	113	4989	1042	-1782	227	94	171
245	108	4836	1021	-1810	227	94	171
246	106	4692	632	-1831	227	94	171
247	98	4536	1111	-1853	227	94	171
248	97	4393	556	-1875	227	94	171
249	90	4242	873	-1888	227	94	171
250	86	4093	774	-1900	227	94	171
251	82	3946	677	-1910	227	94	171
252	74	3788	1114	-1909	227	94	171
253	72	3640	682	-1914	227	94	171
254	66	3487	873	-1916	227	94	171
255	62	3337	733	-1923	227	94	171

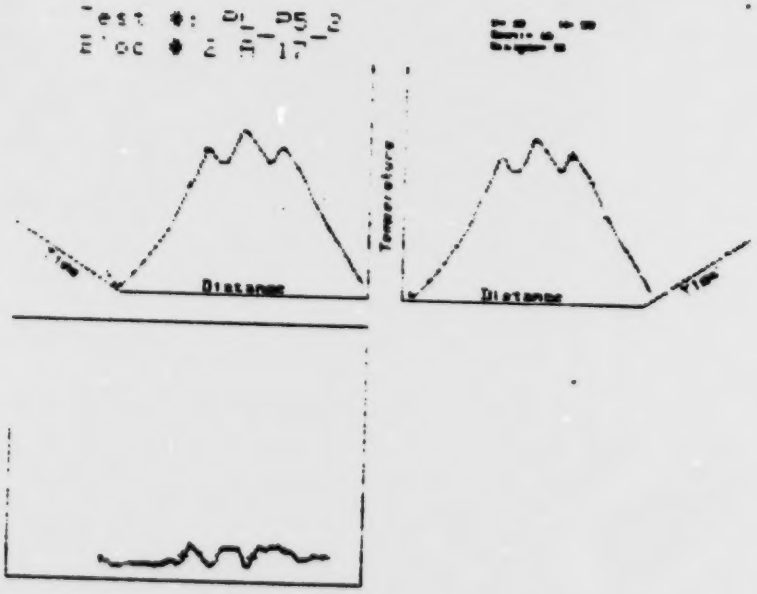


Tableau 1 (suite)

En faisant varier les paramètres des filtres numériques de V_i et $\frac{d^2(V_i)}{dt^2}$ ainsi que la valeur de CVX-SEUIL ou de MINLGDS, nous obtenons une grande flexibilité de détection.

5. FABRICATION DU SYSTÈME DE MESURE À MICROORDINATEUR

Toutes les méthodes numériques exposées dans les section précédentes ont été développées à partir de bains de fusion réels mais en temps différé. Cependant ces méthodes ont été conçues de façon à pouvoir être facilement implantées dans une structure à microprocesseur dédié.

5.1 Description du système

Le schéma bloc de la figure 15 identifie les différentes composantes ainsi que leurs interconnections.

Le système complet est constitué des éléments reliés au soudage proprement dit, tels la torche, la source de courant (MERRICK) et les pyromètres, suivi des éléments d'interface avec l'utilisateur, tels l'imprimante et l'oscilloscope, et puis finalement le coeur du système soit le contrôleur à microprocesseur.

Le contrôleur est construit autour d'un système de carte STD. Comme le système est conçu pour fonctionner dans un environnement électromagnétique très hostile, toutes les entrées/sorties sont protégées contre la haute fréquence par des filtres spéciaux. Le système est centré sur le microprocesseur 8085 qui contrôle les différentes phases du soudage en collaboration avec le microprocesseur de la souce de courant Merrick et qui procède au traitement de l'information en provenance du bain de façon à caractériser le bain de fusion observé.

Une description plus détaillée du système est disponible dans un rapport interne de l'IREQ (3).

5.2 Mode d'emploi du microordinateur

5.2.1 Le panneau avant

Le panneau avant comprend les affichages et les interrupteurs, il est visible sur la photo de la figure 16.

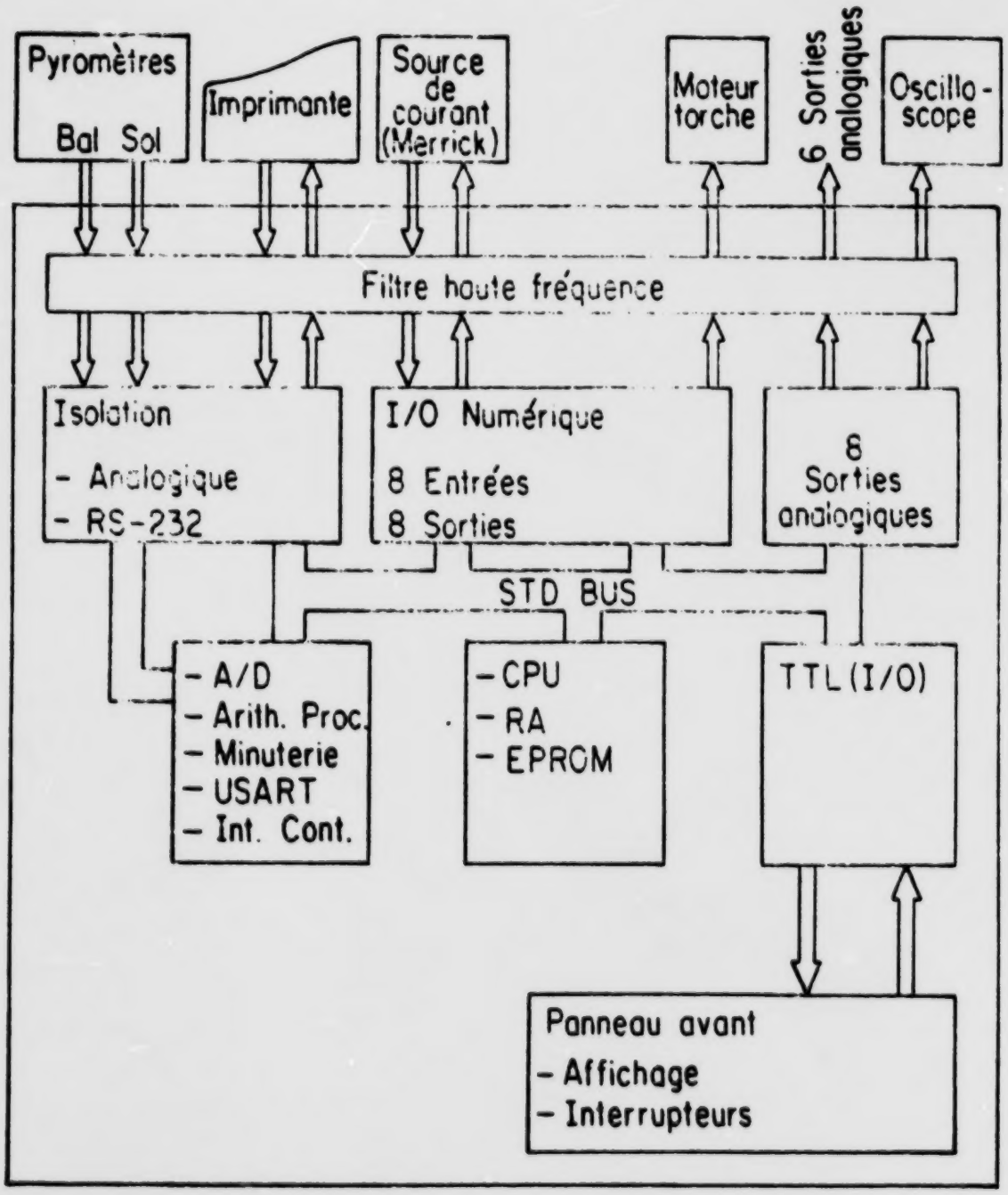


Figure 15: Schéma bloc du système à microordinateur

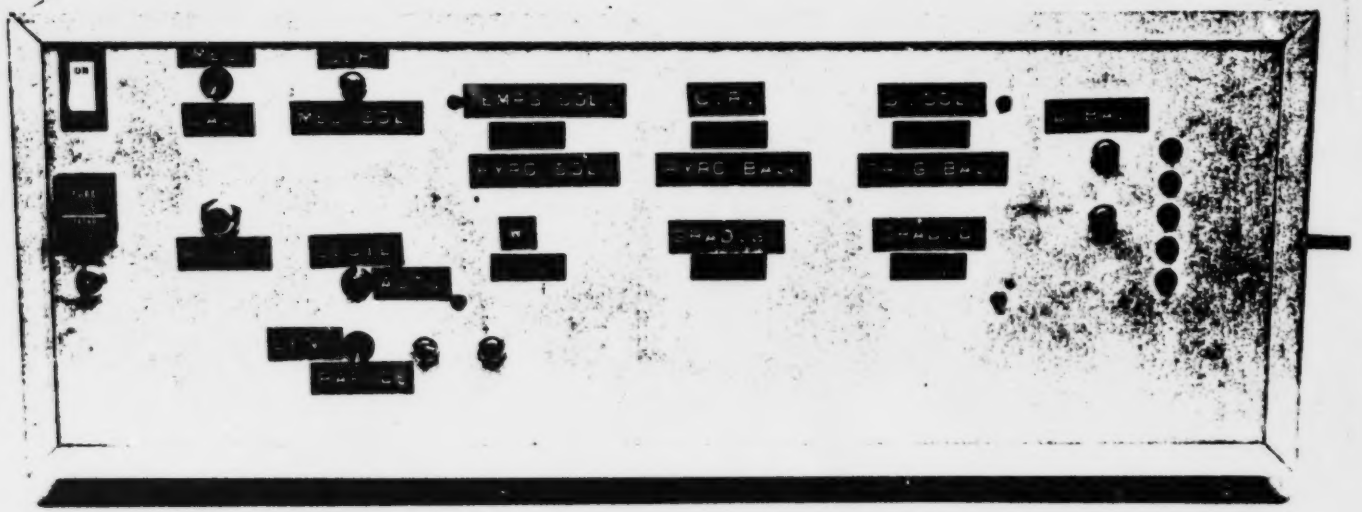


Figure 16: Panneau avant du système à microordinateur

On y trouve de gauche à droite et de haut en bas:

- L'interrupteur principal.
- L'interrupteur permettant d'opérer en mode de calibration ou en mode de mesure.
- Un bouton poussoir servant à initialiser manuellement une mesure de solidification.
- Six affichages digitaux à trois chiffres.
  Les trois affichages supérieurs n'ont pas la même signification suivant que l'on est en mode de calibration ou de mesure.
- Deux boutons poussoirs à droite qui ont pour fonction l'initialisation manuelle des mesures de profil thermique (bouton supérieur) et l'interruption manuelle de tous les modes de mesure (bouton inférieur).
- Deux interrupteurs en bas à gauche qui servent respectivement à choisir le mode de mesure de la largeur du bain (automatique par les convexités ou à partir d'un seuil) et à sélectionner la vitesse de réglage du seuil lorsqu'on est dans ce mode.
- Deux autres boutons poussoirs qui servent respectivement à monter ou à descendre le niveau du seuil.

En mode calibration les trois affichages digitaux supérieurs indiquent respectivement la tension de sortie du pyromètre de solidification, la tension de sortie du pyromètre de balayage et le fonctionnement du trigger de balayage. En mode de mesure ils indiquent le temps de solidification (en millisecondes), la vitesse de refroidissement après solidification (en °C/s x 10^{-1}) et la profondeur de pénétration D_s (en millimètres x 10).

Les trois affichages inférieurs indiquent respectivement la largeur du bain (en mm x 10), le gradient thermique gauche (en °C/mm) et le gradient thermique droit (en °C/mm).

5.2.2 Le panneau arrière

Le panneau arrière (figure 17) comprend 8 optocoupleurs et 8 relais qui permettent d'interfacer le microordinateur avec des systèmes périphériques. On y trouve également 8 BNC dont six fournissent une sortie analogique correspondant aux six affichages du panneau avant et les deux autres sont respectivement une sortie de synchronisation du balayage transversal et le signal lui-même pour visualisation des courbes sur oscilloscope.

Cette visualisation se fait en temps réel. En mode de calibration, le microordinateur génère un signal triangulaire qui permet d'ajuster l'oscilloscope. En mode de mesure, les profils transversaux successifs sont visualisés de même que la courbe de refroidissement lors de la mesure de solidification.

Finalement, le microordinateur peut être raccordé à une imprimante via RS232C. L'imprimante a deux fonctions différentes suivant que l'on est en mode de calibration ou de mesure. En mode de calibration, elle permet de programmer à l'aide de son clavier les différents paramètres du microordinateur. Ses fonctions sont alors les suivantes:

touche E: édition des paramètres,
touche U: passage à la ligne supérieure,
touche RETURN: enregistrement du paramètre,
touche B: sortie du mode d'édition,
touche P: impression de tous les paramètres.

Les seize paramètres qui peuvent être ainsi modifiés sont listés au tableau 2. Leur signification est décrite ci-dessous:

FILTREV-S: filtre numérique de la courbe de refroidissement.

FILTREDV: filtre numérique du profil thermique transversal.

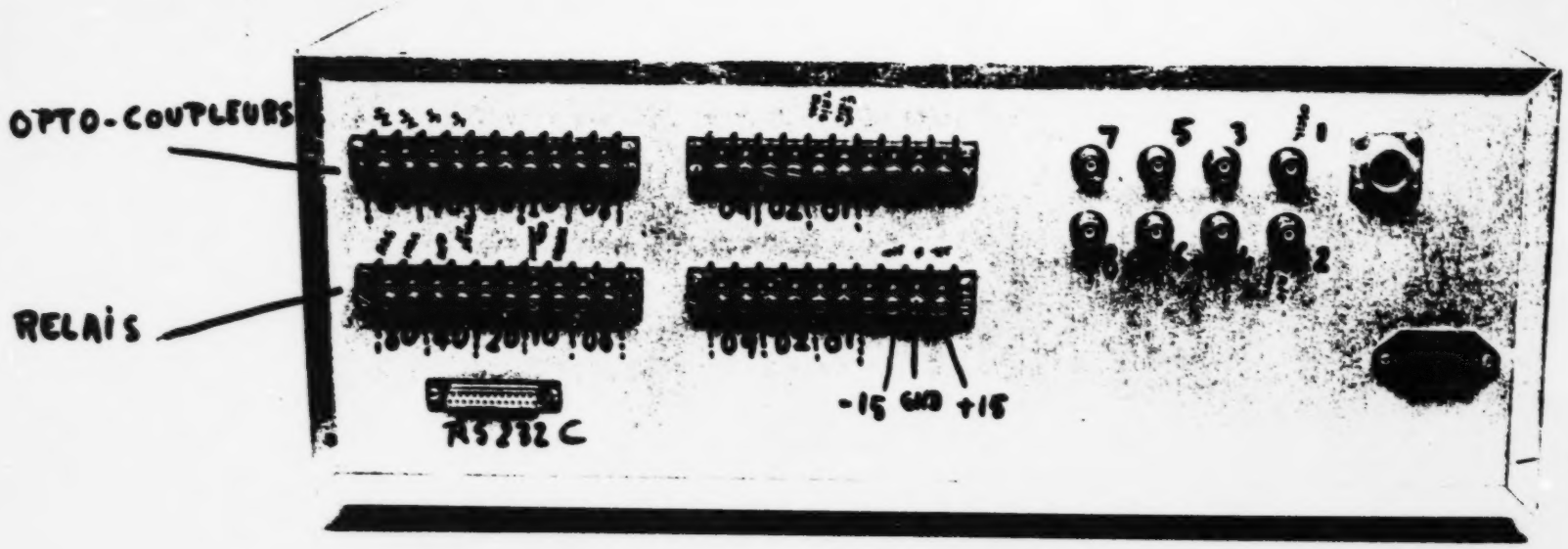


Figure 17: Panneau arrière du système à microordinateur

MINLGDS: durée minimale d'une convexité dans la dérivée seconde pour qu'elle soit détectée.

SNDDERS: seuil de détection de la dérivée seconde, toutes les valeurs inférieures à ce seuil ne sont pas retenues dans les calculs.

DLFSLD: temps d'attente après la détection du dernier maximum pour s'assurer qu'il n'y aura pas d'autre maximum dans la courbe.

K-GRD: facteur de proportionnalité dans l'équation

$$D = \frac{t_f \, G_0}{K_G}$$

où t_f est en seconde, D en cm et G_0 en °C/cm.

A-CAL-SOL
B-CAL-SOL : facteurs de calibration du pyromètre de mesure de la courbe de refroidissement.

A-CAL-BAL: facteur de calibration du pyromètre de mesure du profil thermique transversal. Sur ces courbes on ne calcule que des gradients thermiques, donc le paramètre b de l'équation de calibration n'est pas utilisé.

KSPSHF: facteur de proportionnalité dans l'équation

$D = \frac{K_s}{100000} \, t_f \sqrt{C_r}$ où t_f est exprimé en secondes, D, en cm et C_r en °C/s.

VIT-VER: vitesse de balayage transversal en mm/s.

DELTA-T1: intervalle de temps entre chaque fermeture du relais 40. Ce relais est utilisé pour interrompre l'arc de soudage pendant la mesure de solidification. Le

relais est réouvert dès que la mesure est faite. Pour rendre ce relais inopérant il faut attribuer la valeur - 1 à DELTA-T1.

DELTA-T2: délai non utilisé dans les procédures que nous avons programmées.

DELTA-T3: intervalle de temps permettant de fermer un relais après l'initialisation de DELTA-T1, peut servir à contrôler le déplacement de la torche.

T-FUS: température de fusion du métal que l'on soude.

En mode de mesure le microordinateur fait imprimer en temps réel les valeurs mesurées et calculées, soit le temps de la mesure en seconde, la largeur du bain de fusion (en mm x 10), les gradients thermiques latéraux à gauche et à droite du bain (en °C/mm), le temps de solidification en mm/s, la vitesse de refroidissement juste après solidification en °C/s x 10^{-1}, la pénétration calculée à partir de la vitesse de refroidissement (D-sol en mm x 100) et la pénétration calculée à partir de la moyenne des deux derniers gradients latéraux (en mm x 100).

Si le balayage transversal n'est pas en opération, seules les mesures de solidification sont imprimées.

5.2.3 Procédures de soudage

Le microordinateur peut être interfacé avec la source de courant Merrick et avec le moteur d'avance de la torche pour générer des procédures de soudage avec mesure simultanée de la largeur du bain, des gradients thermiques latéraux et de la profondeur de pénétration. Le panneau arrière du microprocesseur AMPTRAK de la MERRICK est présenté à la figure 18.

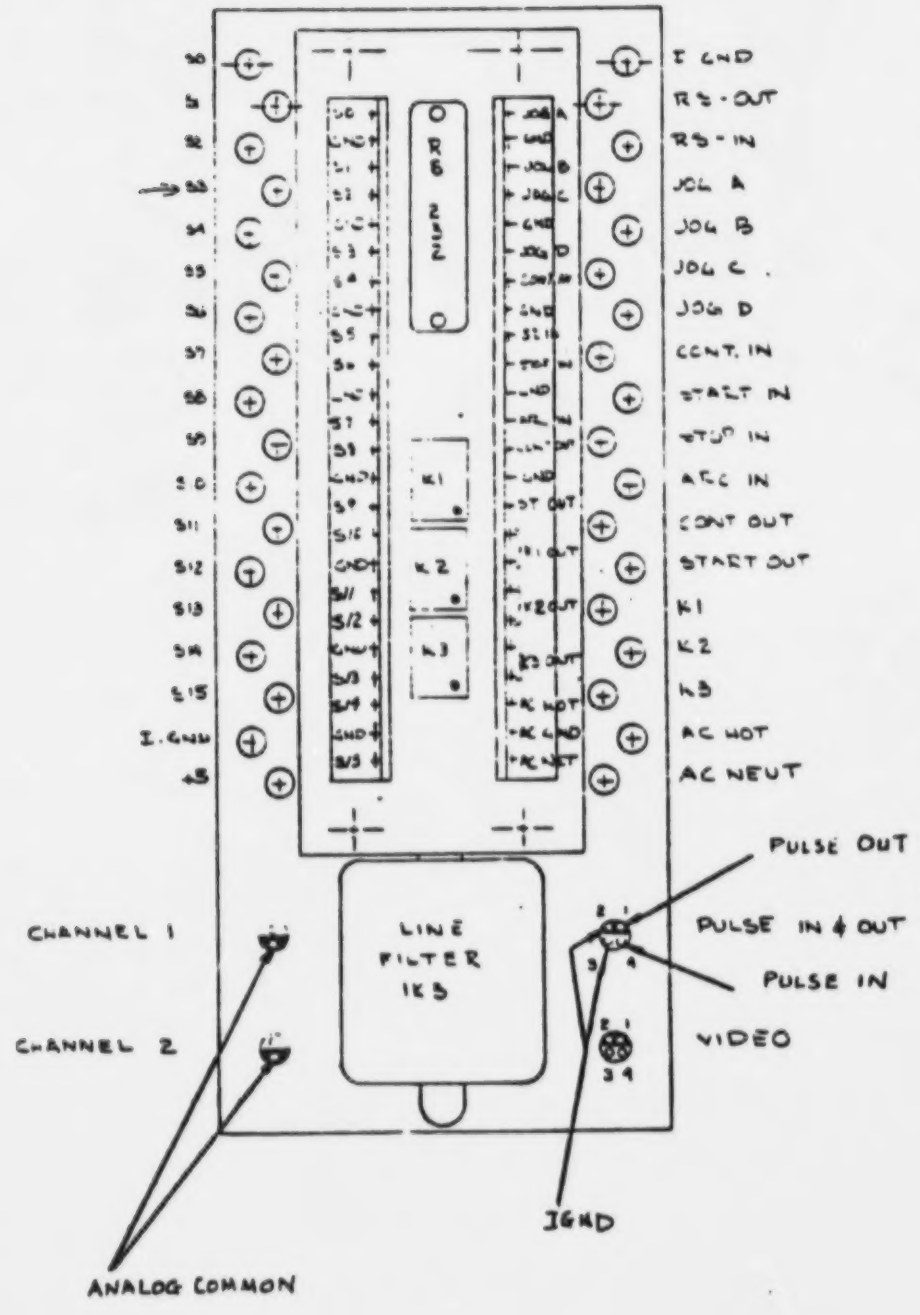


FIGURE 10-8
REAR PANEL
AMPTRAK MICRO 4/81

Figure 18: Panneau arrière du microprocesseur AMPTRAK

La première procédure est applicable au soudage GTAW par point. Cette procédure nécessite uniquement le contrôle du courant de soudage, les fonctions de prépurge, démarrage de l'arc et postpurge sont assurées par la Merrick, lorsque l'arc est démarré le signal est transmis (sortie S1 de la Merrick) à l'optocoupleur 40 qui a la même fonction que le bouton de départ de mesure de balayage du panneau frontal. Les gradients thermiques latéraux et la largeur du bain sont alors mesurés et imprimés à chaque balayage. La durée du soudage est contrôlée par la Merrick et lorsque l'arc est interrompu, un signal (sortie S2 de la Merrick) est transmis à l'optocoupleur 80 qui a la même fonction que le bouton de départ de mesure de solidification. Ce signal déclenche le processus de mesure.

La deuxième procédure est applicable aux passes de soudage GTAW sans métal d'apport, elle réalise une mesure de pénétration a intervalles réguliers, l'intervalle de temps entre chaque mesure est DELTA-T1. Le microordinateur contrôle le moment de la mesure, l'interruption de l'arc et l'arrêt de la torche.

D'autres procédures plus complexes pourraient être programmées dans le microprocesseur au fur et à mesure des besoins.

6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

6.1 Soudage GTAW par point sur acier inoxydable

Une photo du montage est présentée à la figure 19. Deux plaques d'acier sont soudées l'une à l'autre par point. Une légère pression est exercée par la buse en céramique pour maintenir les plaques en contact. Deux ouvertures sont pratiquées dans la buse pour permettre l'observation du bain par les deux capteurs infrarouges. Le capteur de gauche est actionné par un vérin pneumatique pour balayer transversalement le bain tandis que le capteur de droite est fixe et observe le centre du bain.

Lors de chaque expérience la courbe de refroidissement après extinction de l'arc était enregistrée sur oscilloscope de façon à comparer les mesures du microordinateur avec celles prises sur la courbe de l'oscilloscope. Les courbes pouvaient être conservées sur papier grâce à un programme de traçage intégré à l'oscilloscope.

Des plaques de 1,2 mm et 1,5 mm d'épaisseur ont été utilisées lors de ces essais. Les paramètres du microordinateur sont listés au tableau 2. Les paramètres K_G (K - GRD) et K_s (KSPSHF) ont été déterminés expérimentalement par ajustement de la valeur calculée et de la valeur mesurée sur une série d'expériences préliminaires. On peut remarquer que la valeur expérimentale de K_G (7410) est identique à la valeur théorique que l'on peut calculer à partir des paramètres physiques de l'acier inoxydable (2). Pour ce qui concerne K_s le modèle ne nous permet pas de le calculer, on sait seulement que ce facteur est proportionnel à $\frac{1}{H_f}\sqrt{(T_f - T_\infty)\,\alpha}$, soit si l'on suppose que $T_\infty = 20°C$ (pas de réchauffage) une valeur numérique de 0,02 cm $s^{-\frac{1}{2}}$ $°C^{-\frac{1}{2}}$ pour l'acier inoxydable et 0,025 cm $s^{-\frac{1}{2}}$ $°C^{-\frac{1}{2}}$ pour l'acier au carbone.

Nous avons réalisé une série de 14 essais Z1 à Z14 avec ces paramètres en modifiant l'intensité du courant de soudage et en maintenant un temps d'arc de 8 secondes.

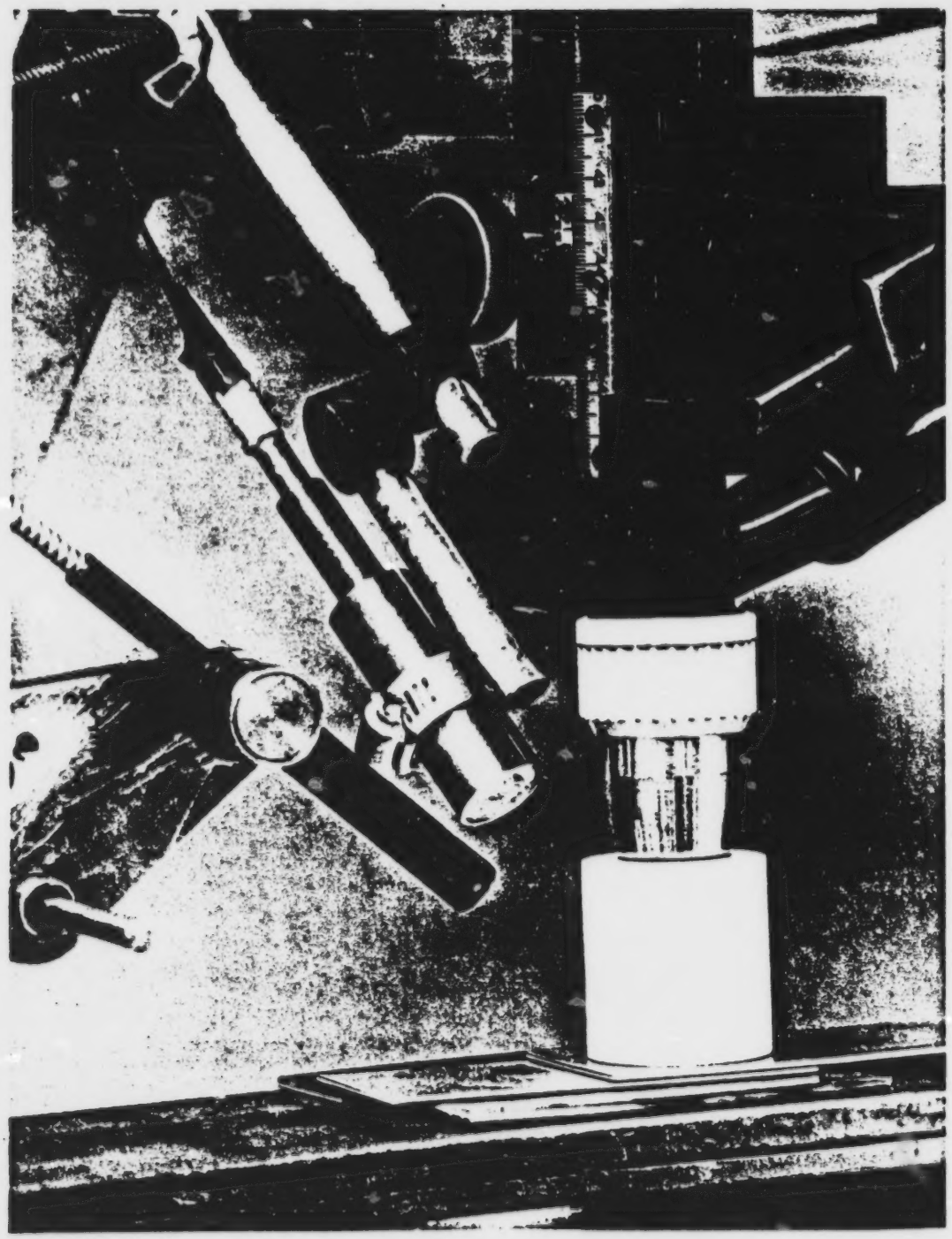


Figure 19: Montage de soudage par point de capteurs infrarouges à fibre optique

Paramètres acier inoxydable

PRINT SET # 0

1.	FILTREV_S	Temperature 0015
2.	FILTREV_B	Temperature 0015
3.	FILTREDV	Derivee seconde ..0625
4.	MINLGDS	Longueur minimum .0025
5.	SNDDERS	Seuil detection ..-0100
6.	DLFSLD	Attente sol, (ms) 0700
7.	K_GRD	Facteur K (grd)...7410
8.	A_CAL_SOL	Calibration 0196
9.	B_CAL_SOL	Calibration 0315
10.	A_CAL_BAL	Calibration 0188
11.	KSPSHF	Facteur K (X 1000)1045
12.	VIT_VER	Vitesse (mm/s) ...0036
13.	DELTA_T1	Temps #1 (10ms) ..-0001
14.	DELTA_T2	Temps #2 (10ms) ..-0001
15.	DELTA_T3	Temps #3 (10ms) ..-0001
16.	T_FUS	Temp. fusion 1430

Tableau 2 Paramètres du miniordinateur pour l'acier inoxydable

Un exemple de résultats fournis par le microprocesseur pour l'essai Z1 est présenté dans le tableau 3. La largeur du bain (colonne W) augmente progressivement passant de 1,4 à 5,1 mm. On constate que le

..

TEMPS (s)	W (dmm)	GrdG (C/mm)	GrdD	Tsol (ms)	Vit (C/ds)	D_sol (cmm)	D_grd
0682.93	0014	0279	0192				
0680.06	0021	0256	0176		ESSAI Z1		
0679.20	0029	0269	0165				
0678.34	0037	0337	0179				
0677.49	0043	0373	0205				
0676.62	0046	0371	0211				
0675.76	0051	0336	0230				
0673.10				0414	0029	0158	0173

Tableau 3 Résultats expérimentaux fournis par le système de mesure

gradient thermique gauche est toujours supérieur au gradient droit du fait du problème de temps de réponse déjà mentionné. De plus, les gradients ont tendance à augmenter avec le temps alors qu'il devraient diminuer. Cet effet résulte probablement d'une augmentation de l'émissivité à proximité du bain due à la déposition de particules métalliques.

Notons que pour calculer la profondeur de pénétration à partir des gradients thermiques latéraux, le microprocesseur fait la moyenne des deux gradients mesurés lors du dernier balayage, soit pour l'essai Z1, 336°C/mm et 230°C/mm.

Les résultats complets des expériences Z1 à Z14 sont rassemblés dans le tableau 4. On y compare les paramètres calculés sur l'enregistrement oscilloscopique des courbes de refroidissement (ces courbes sont jointes au rapport, figures 20 à 33), les paramètres mesurés par le microordinateur et la profondeur de pénétration et la largeur de la soudure mesurés directement sur les échantillons. Pour les essais Z1 à Z9 les deux plaques soudées avaient 1,2 mm d'épaisseur et on s'est contenté de vérifier si la soudure avait pénétré la plaque inférieure ou non. Dans tous les cas D_s est en accord avec les observations métallographiques; la pénétration calculée à partir des gradients thermiques, D_G, par contre est fausse pour l'essai Z4. Si on observe les valeurs des gradients thermiques latéraux, on constate une variation importante de ces valeurs sans relation apparente avec l'énergie de fusion, on peut donc s'attendre à une erreur assez grande sur les mesures de D_G.

L'essai Z10 (plaque de 1,5 mm soudée sur une plaque de 1,2 mm) et les essais Z11 à Z13 (deux plaques de 1,5 mm soudés l'une sur l'autre) confirment les observations précédentes. Dans le cas de l'essai Z14 la rupture de pente en fin de solidification est très peu marquée et la détection de la fin de solidification a été ratée. Nous nous sommes souvent heurtés à ce problème de détection lorsque le bain de fusion était assez large car il arrivait fréquemment que le centre du bain ne coincide pas avec l'intersection de l'axe de l'electrode et de la plaque (bain

Tableau 4 Résultats de 14 essais de soudage GTAW par point sur acier inoxydable

	I (A)	Temps d'arc (s)	Paramètres mesurés sur l'enregistrement oscilloscopique		Paramètres mesurés par le microordinateur						Paramètres mesurés sur les échantillons	
			t_f (s)	C_r °C/s	t_f (s)	C_r °C/s	G_0 (°C/mm)	D_s (mm)	D_G (mm)	W (mm)	D (mm)	W (mm)
Z1	50	8	0,370	997	0,416	890	283	1,29	1,58	5,1	1,2 D 2,4	5,0
Z2	45	8	0,274	1051	0,340	1130	258	1,19	1,18	3,8	1,2	4,1
Z3	40	8	0,200	2096	0,243	1750	262	1,06	0,85	2,5	1,2	3,1
Z4	55	8	0,412	738	0,452	930	171	1,44	1,04	5,2	1,2 D 2,4	5,5
Z5	55	8	0,518	1057	0,531	960	168	1,72	1,65	4,8	1,2 D 2,4	5,5
Z6	45	8	0,316	1277	0,375	1360	246	1,44	1,70	4,1	1,2 D 2,4	4,5
Z7	40	8	0,158	2170	0,204	1930	179	0,93	0,67	2,2	1,2	2,8
Z8	45	8	0,358	869	0,427	1040	232	1,44	1,83	4,3	1,2 D 2,4	4,5
Z9	50	8	0,416	813	0,461	960	208	1,49	1,77	5,0	1,2 D 2,4	5,0
Z10	60	8	0,622	976	0,670	950	212	2,16	2,63	6,5	1,5 D 2,7	6,8
Z11	60	8	0,356	1270	0,412	1300	209	1,55	1,16	4,5	1,5	4,7
Z12	70	8	0,480	1100	0,539	1020	209	1,80	1,52	5,5	1,65	5,3
Z13	80	8	0,712	960	0,730	850	202	2,22	1,99	6,7	2,05	6,7
Z14	90	8	0,864	916	0,327	1260	209	1,21	0,92	7,3	2,60	6,9

Acier Inox Z 1 (1,2mm + 1,2mm)

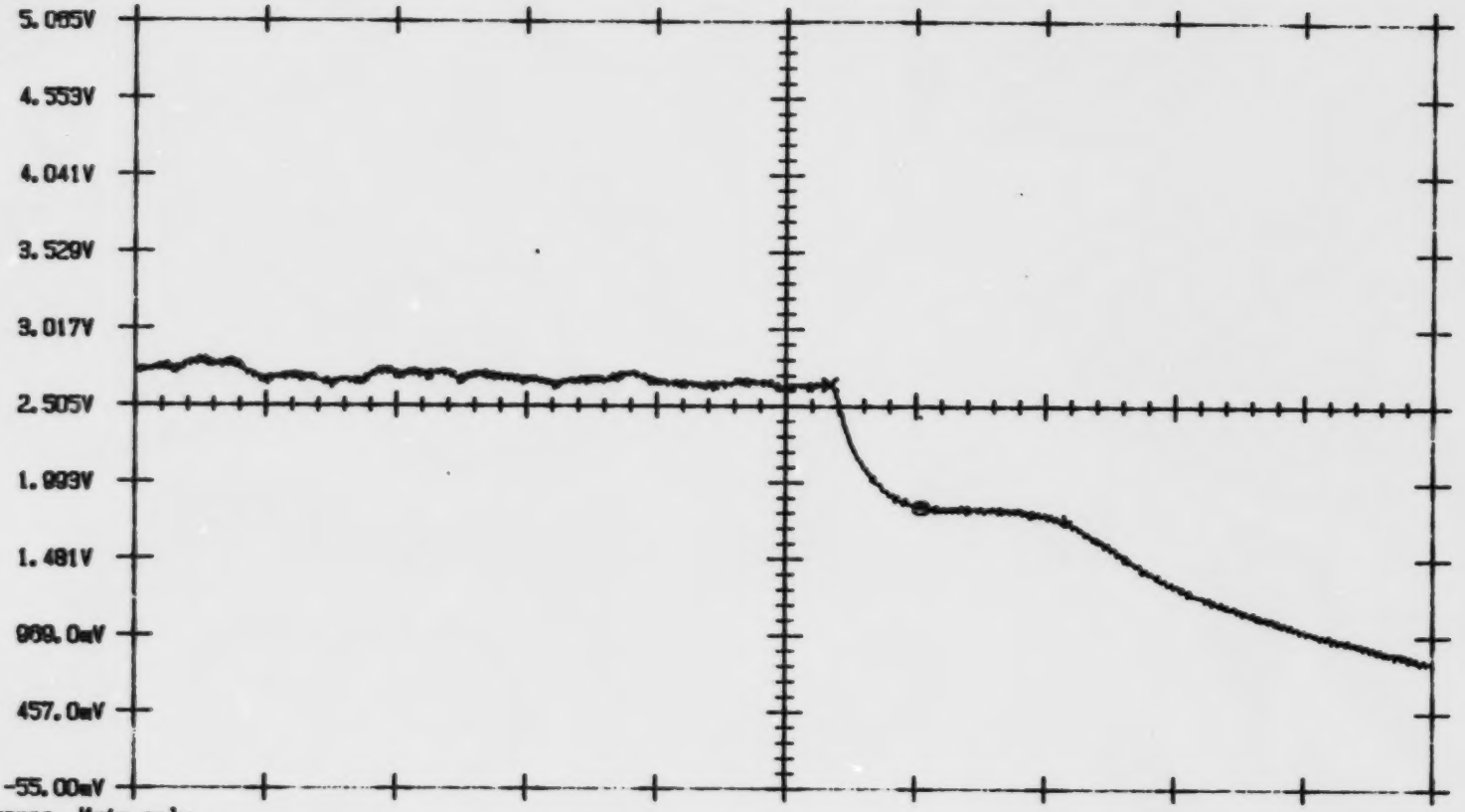
Soudage : I = 50A ; t = 8s

Channel A-Trace loc. 2
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Ver. gain ±2.580V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt., 205.msec/div
Trg. pos. -60% -1.23600sec
level 36% 1.820V
hys. 1% 40.00mV
Trg. time 08.5331e 03sec

Cursor measurement
-144.000msec (x-o); 2.6400V (x)
370.000msec (+-x); -900.00mV (+-x)

Figure 20: Courbe de solidification de l'essai Z1

Acier Inox Z2 (1,2 mm + 1,2 mm)

Soudage : I = 45A, t = 8s

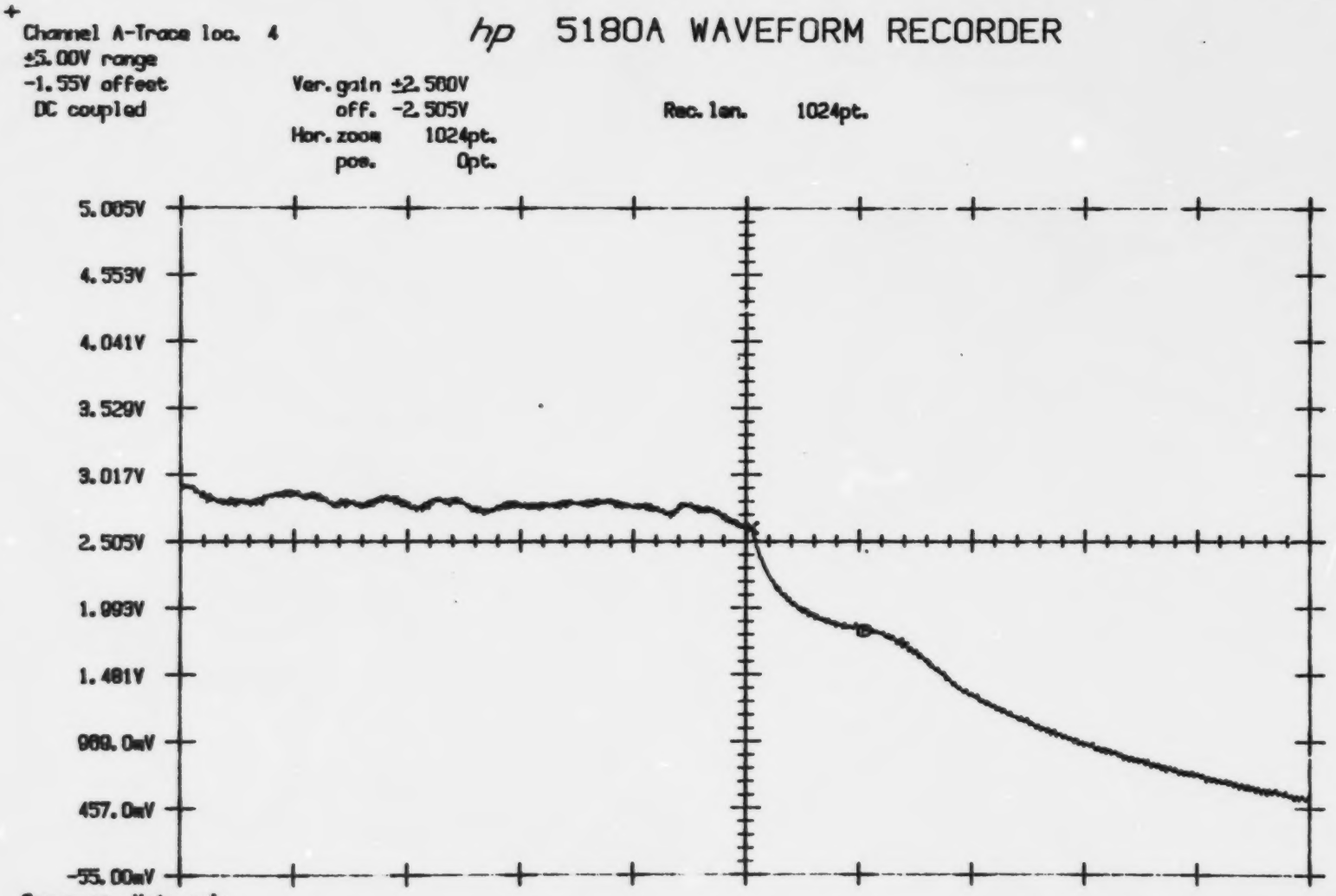


Figure 21: Courbe de solidification de l'essai Z2

Acier Inox : Z3 (1,2 mm + 1,2 mm)

Soudage : I = 40 A ; t = 8s

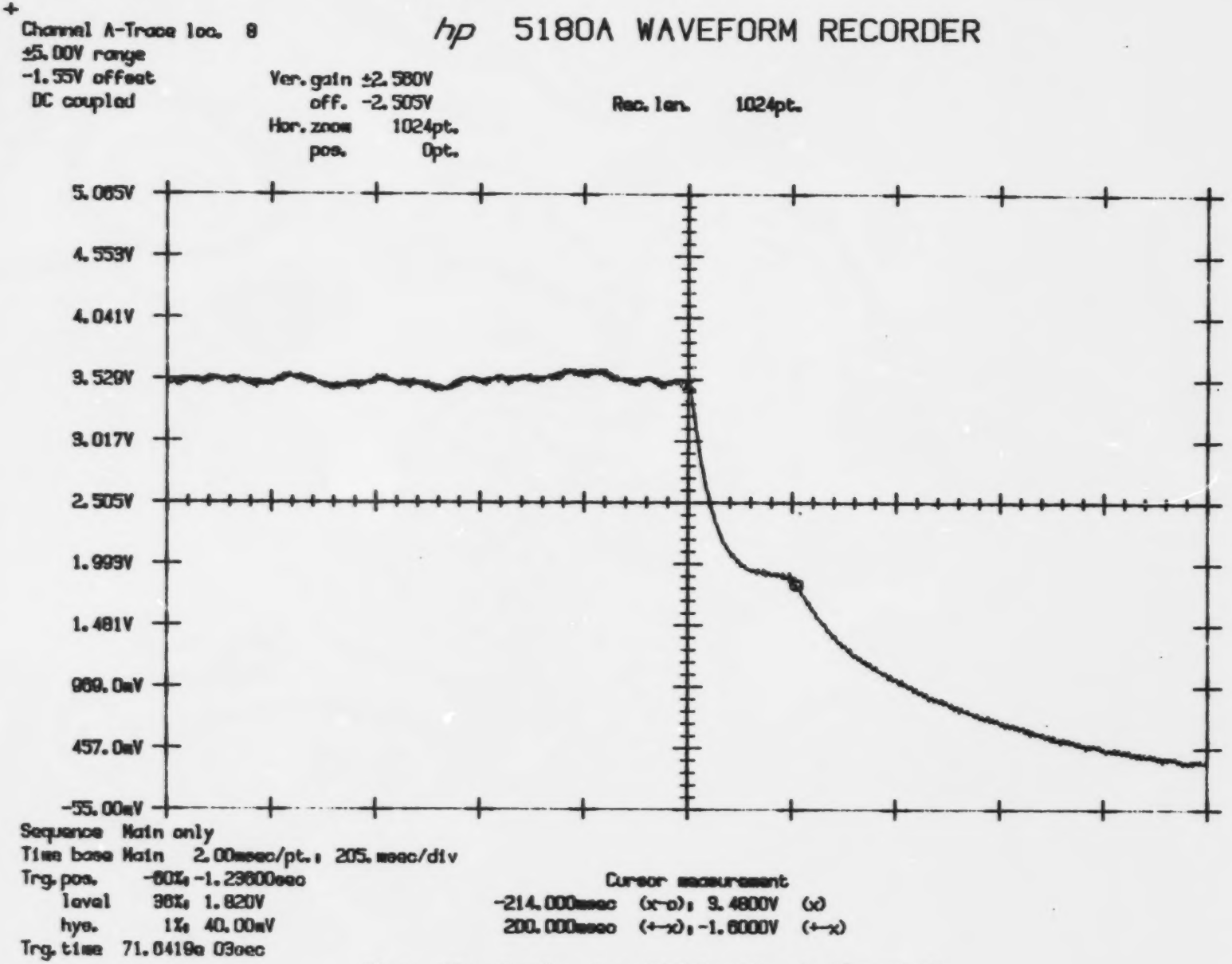


Figure 22: Courbe de solidification de l'essai Z3

Acier Inox : Z4 (1,2+1,2)

Soudage : I= 55 A ; t = 8s

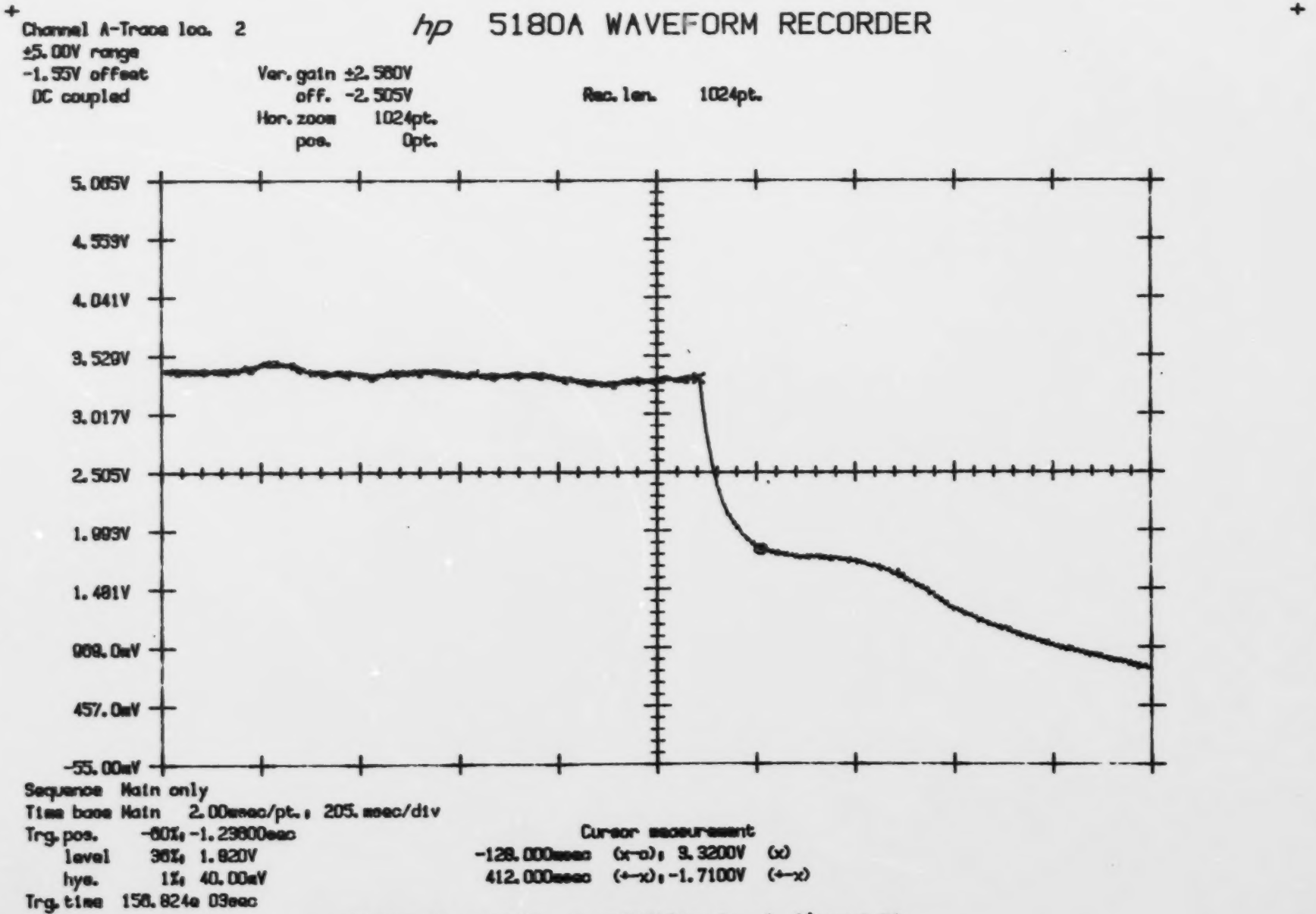


Figure 23: Courbe de solidification de l'essai Z4

Acier Inox Z5 (1,2+1,2)
Soudage : I = 55 A ; t = 8s

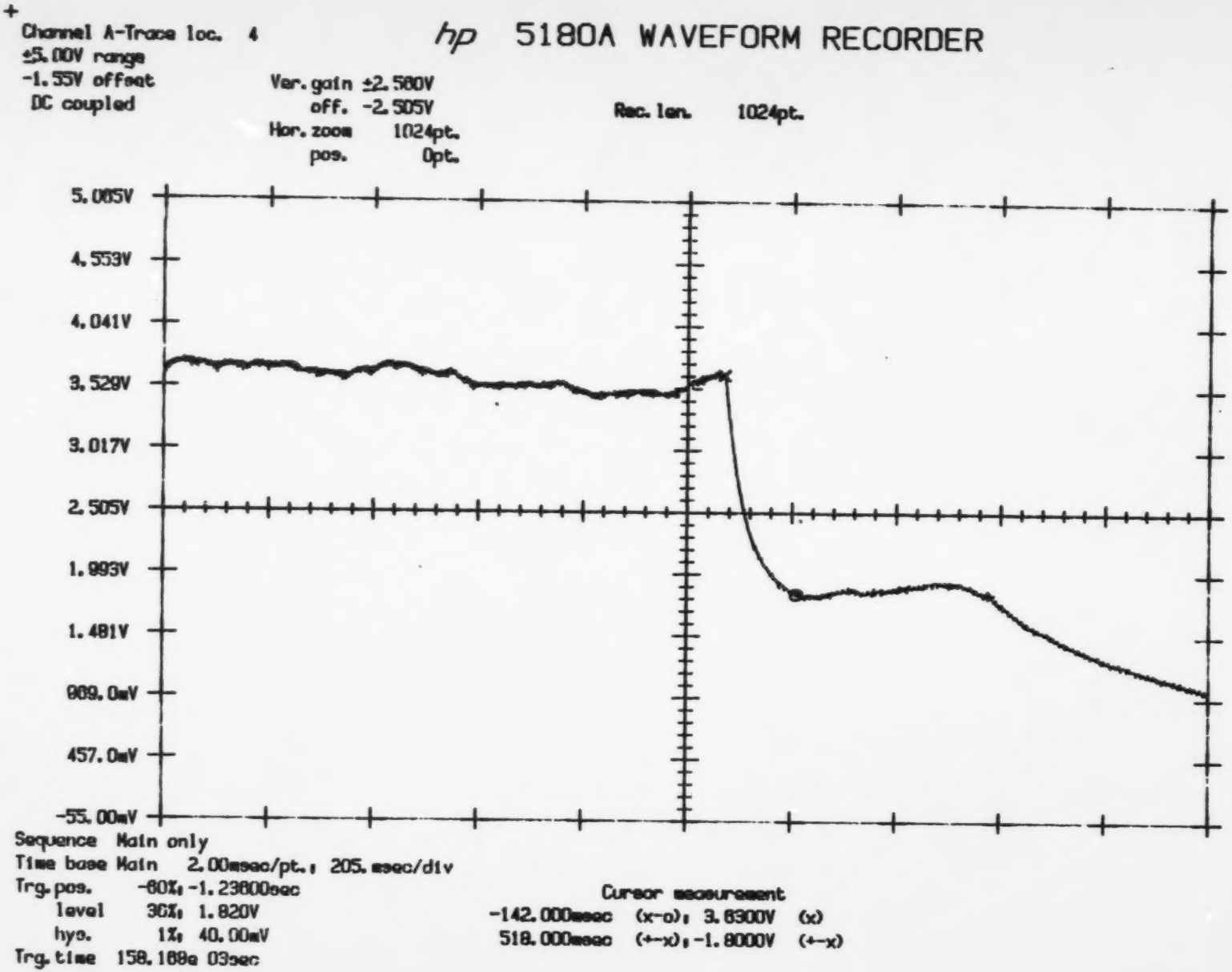
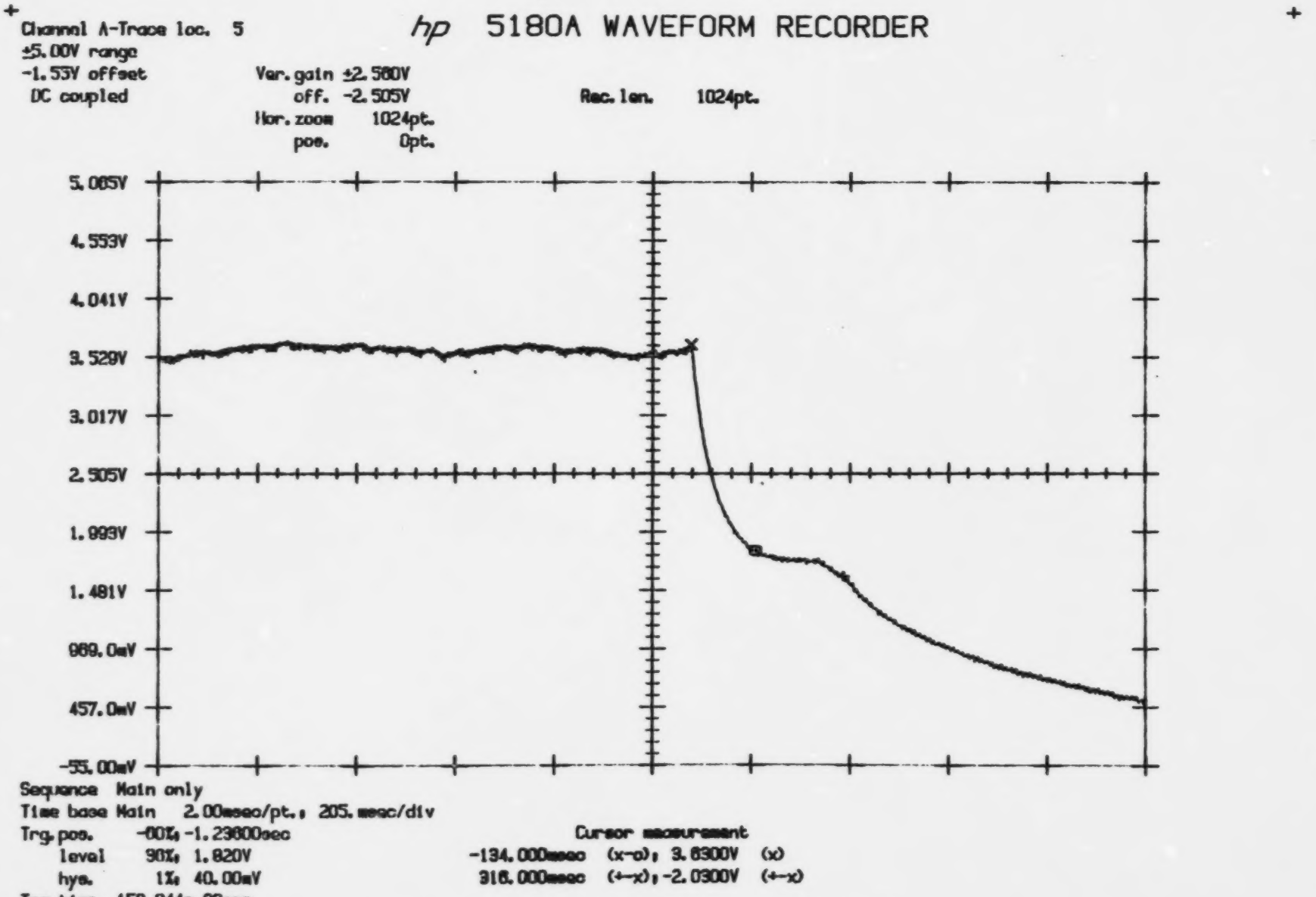


Figure 24: Courbe de solidification de l'essai Z5

Acier Inox : Z6 (1,2+1,2)

soudage : I = 45 A ; t = 8s



hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Figure 25: Courbe de solidification de l'essai Z6

Acier Inox Z7 (1,2+1,2)

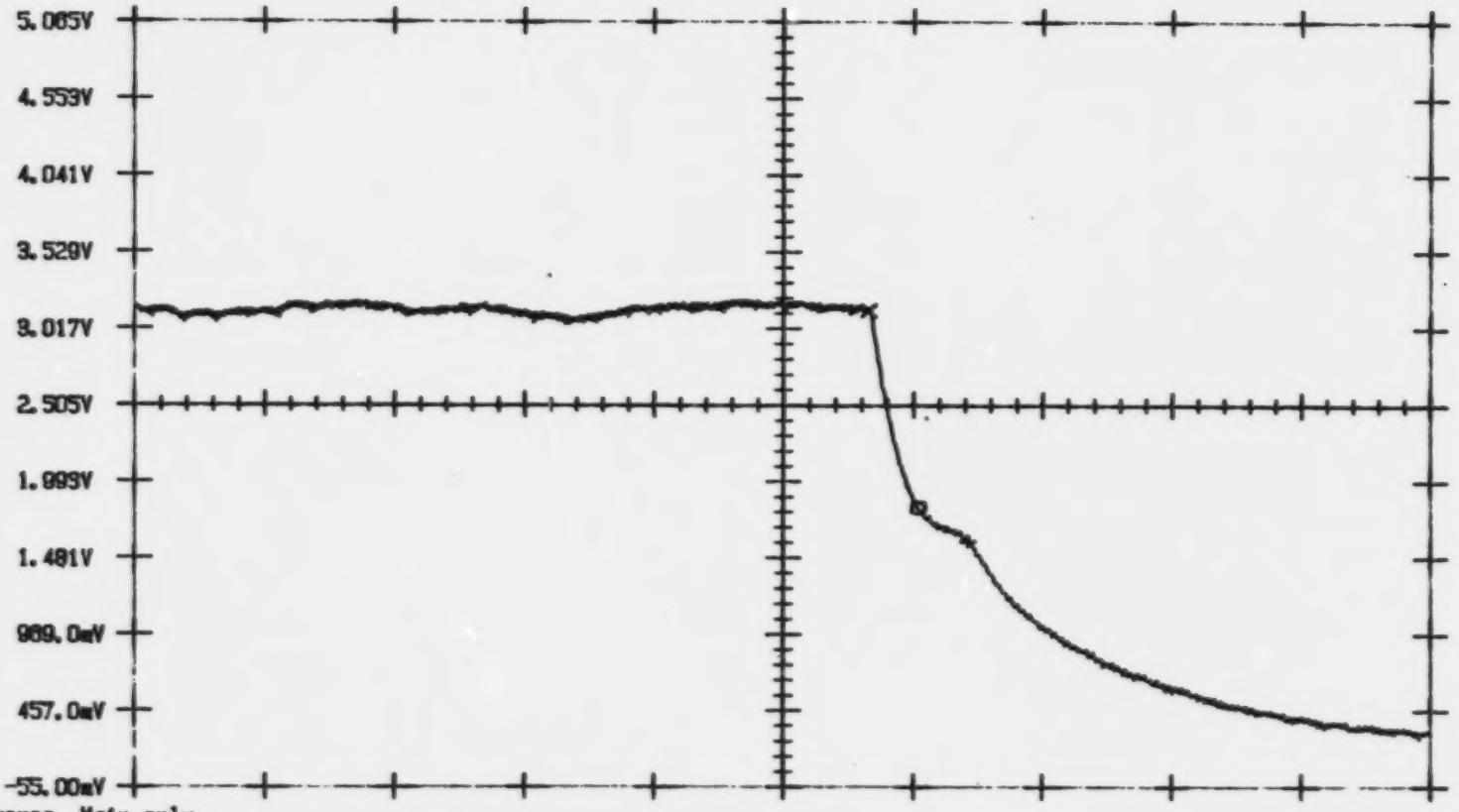
Soudage : 40A ; 8s

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Channel A-Trace loc. 6
±5.00V range
-1.53V offset
DC coupled

Var. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt., 205.msec/div
Trg. pos. -60% -1.23600sec
level 36% 1.820V
hys. 1% 40.00mV
Trg. time 167.498e 03sec

Cursor measurement
-80.0000msec (x-o); 3.1300V (x)
158.000msec (←x); -1.5400V (←x)

Figure 26: Courbe de solidification de l'essai Z7

Acier Inox Z8 (1,2+1,2)

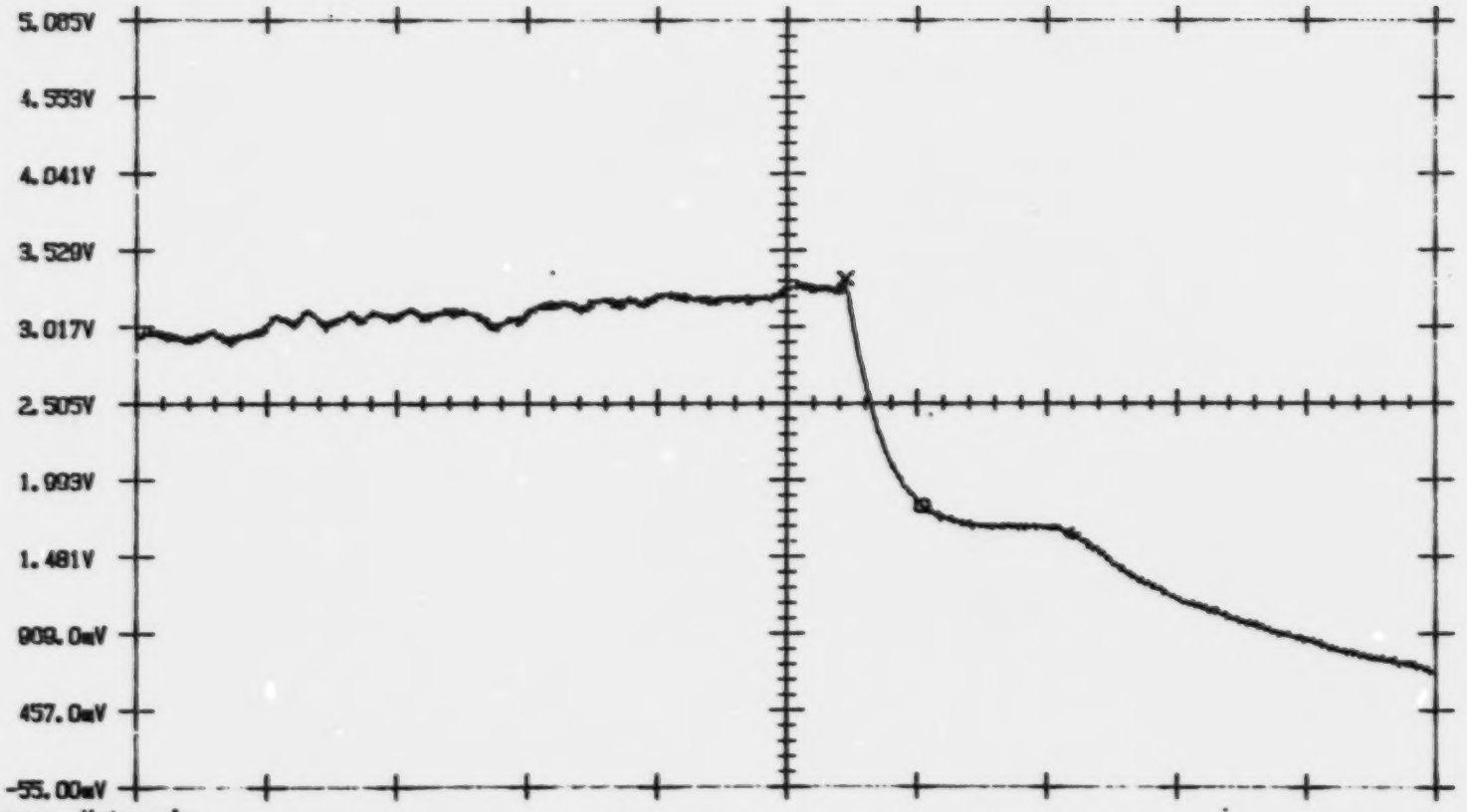
Soudage : I = 45 A ; t = 8 s

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Channel A-Trace loc. 7
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

Ver. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt., 205.msec/div
Trg. pos. -60% -1.23600sec
level 36% 1.820V
hys. 1% 40.00mV
Trg. time 167.031e 03sec

Cursor measurement
-122.000msec (x-o), 9.3300V (o)
958.000msec (+-x), -1.7000V (+-x)

Figure 27: Courbe de solidification de l'essai Z8

Acier Inox Z9 (1,2+1,2)

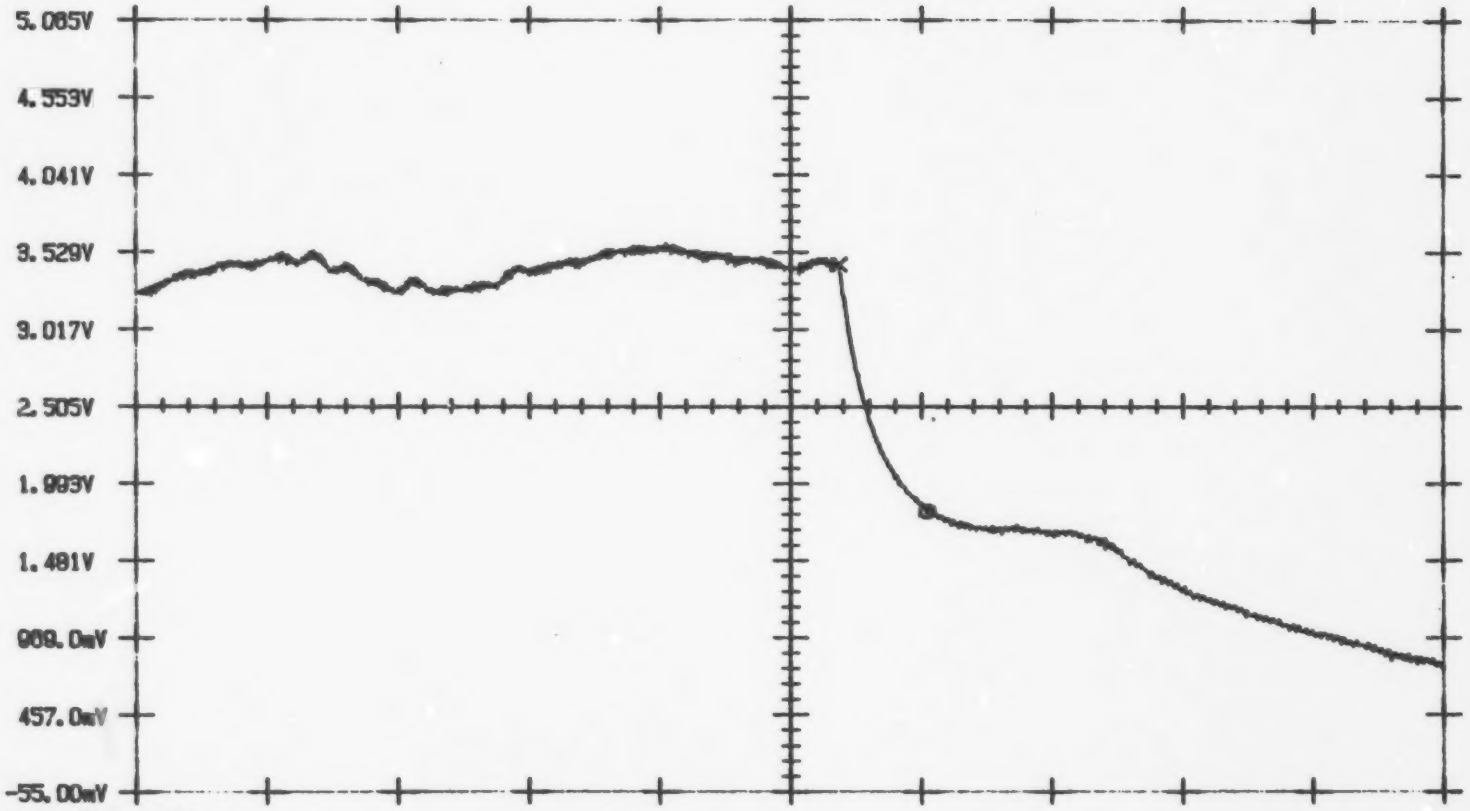
Soudage : I = 50 A ; t = 8 s

Channel A-Trace loc. 8
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Var.gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor.zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec.len. 1024pt.



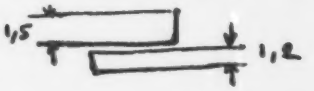
Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt.: 205.msec/div
Trg.pos. -60%:-1.23600sec
level 36%: 1.820V
hys. 1%: 40.00mV
Trg.time 167.849m 03sec

Cursor measurement
-198.000msec (x-o): 3.4400V (x)
418.000msec (+-x):-1.8500V (+-x)

Figure 28: Courbe de solidification de l'essai Z9

Acier Inox Z 10 (1,5 mm + 1,2 mm)

Soudage : I = 60 A ; t = 8 s

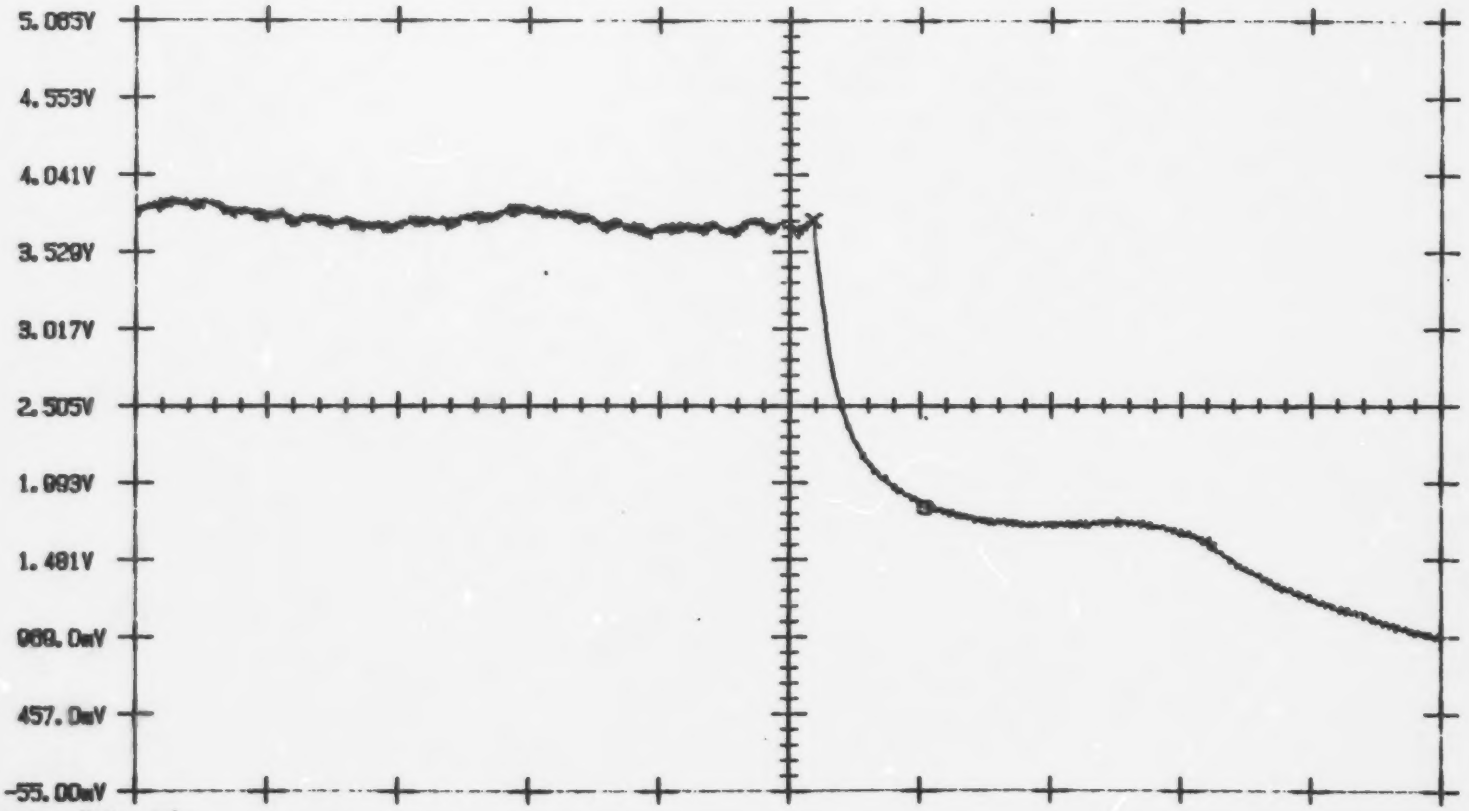


Channel A-Trace loc. 0
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

Var. gain ±2.560V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Rec. len. 1024pt.



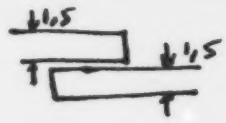
Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt.; 205.msec/div
Trg. pos. -80%; -1.23600sec
level 96%; 1.820V
hys. 1%; 40.00mV
Trg. time 167.957e 03sec

Cursor measurement
-178.000msec (x-o); 3.7900V (x)
622.000msec (+-x); -2.1400V (+-x)

Figure 29: Courbe de solidification de l'essai Z10

Acier Inox : Z11 (1,5 + 1,5)

Soudage : I = 60 A ; t = 8s



Channel A-Trace loc. 1
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Var. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.

7

5.085V
4.553V
4.041V
3.529V
3.017V
2.505V
1.993V
1.481V
969.0mV
457.0mV
-55.00mV

Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt.; 205.msec/div
Trg. pos. -60% -1.23000sec
level 30% 1.820V
hys. 1% 40.00mV
Trg. time 8.07500e 09sec

Cursor measurement
-190.000msec (x-o); 3.6900V (x)
358.000msec (+-x); -2.1000V (+-x)

Figure 30: Courbe de solidification de l'essai Z11

Acier Inox : Z12 (1,5 + 1,5)

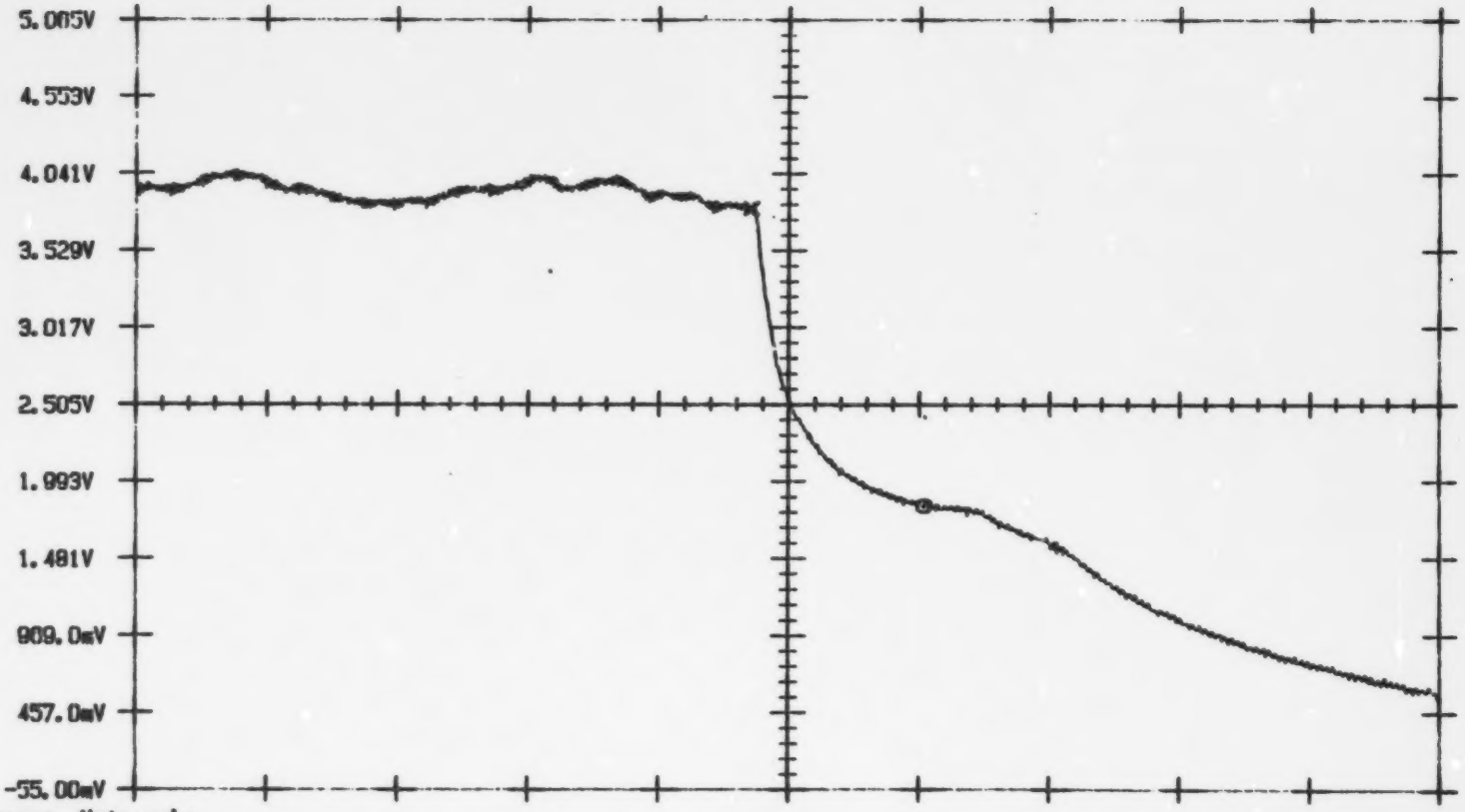
Soudage : I = 70 A ; t = 8 s

Channel A-Trace loc. 2
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Ver. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt.: 205.msec/div
Trg. pos. -00%: -1.23600sec
level 30%: 1.920V
hys. 1%: 40.00mV
Trg. time 17.2053a 03sec

Cursor measurement
-272.000msec (x-o): 3.8000V (x)
480.000msec (+-x): -2.2500V (+-x)

Figure 31: Courbe de solidification de l'essai Z12

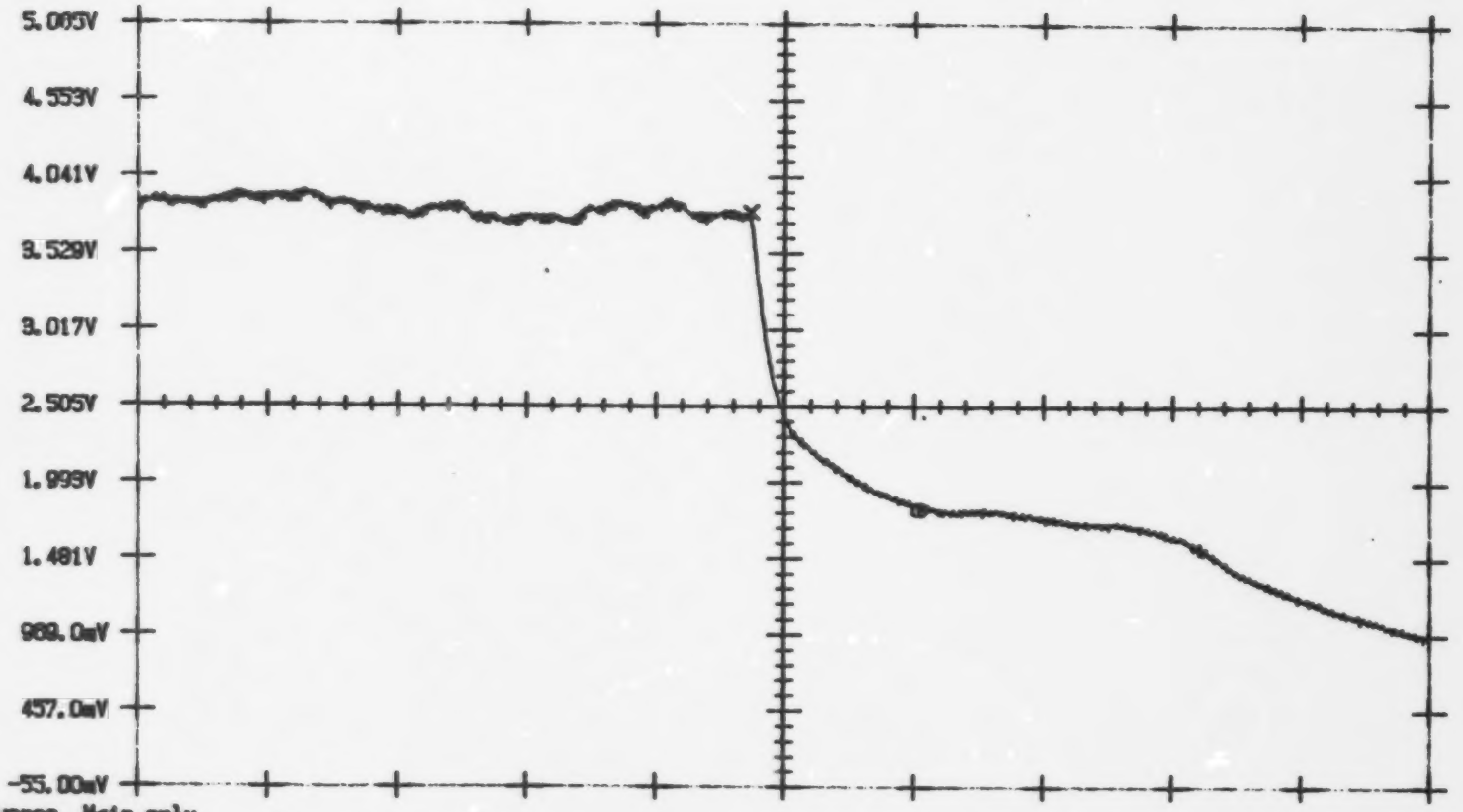
Acier Inox : Z 13 (1,5+1,5)

Soudage : I = 80 A ; t = 8 s

Channel A-Trace loc. 3
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Ver. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.
Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt., 205.msec/div
Trg. pos. -00% -1.23000sec
level 30% 1.820V
hys. 1% 40.00mV
Trg. time 18.0524e 03sec

Cursor measurement
-288.000msec (x-o); 3.8000V (x)
712.000msec (←x); -2.2500V (←x)

Figure 32: Courbe de solidification de l'essai Z13

Acier inox : Z14 (1,5 + 1,5)

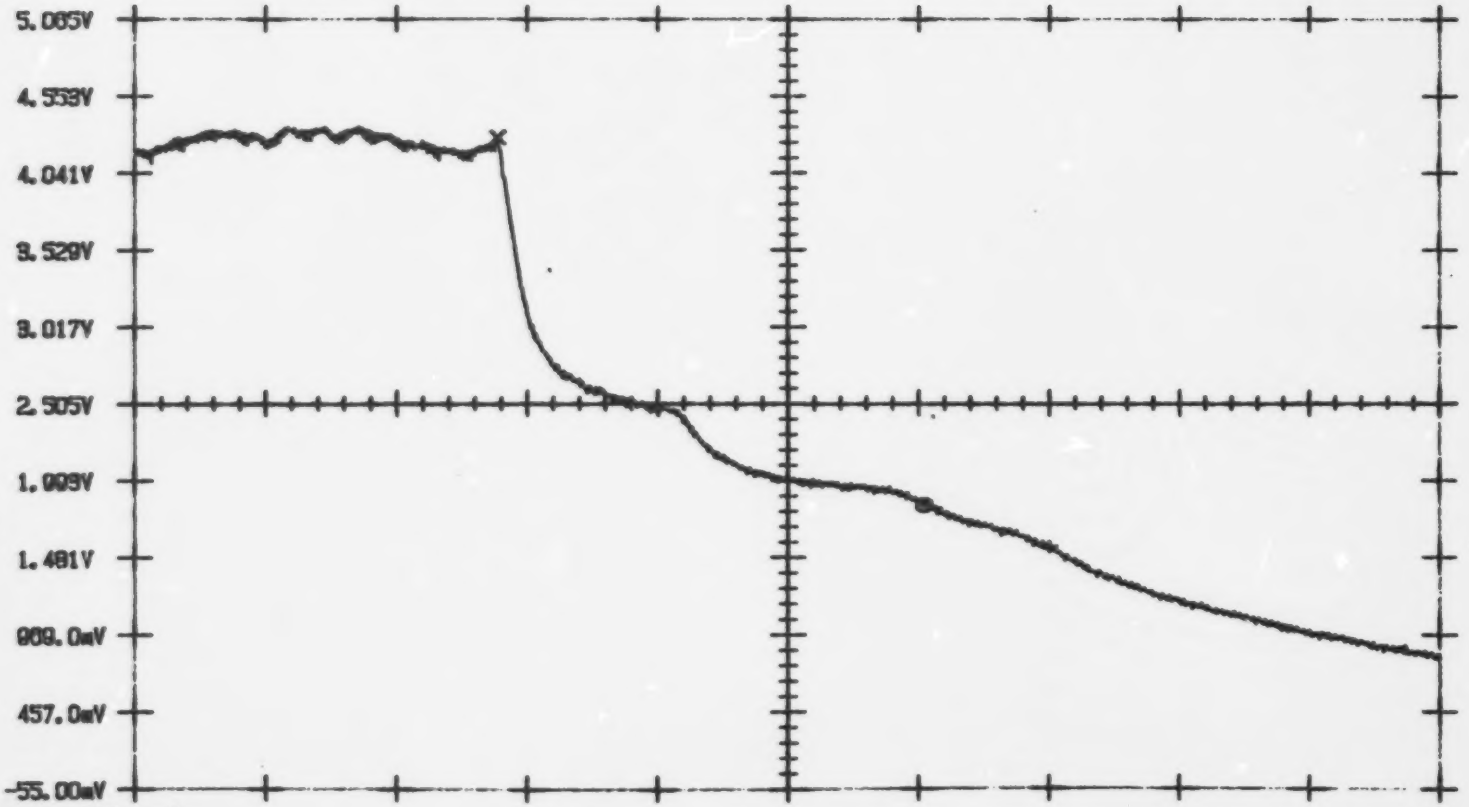
Soudage : I = 90A ; t = 8s

Channel A-Trace loc. 4
±5.00V range
-1.55V offset
DC coupled

hp 5180A WAVEFORM RECORDER

Ver. gain ±2.500V
off. -2.505V
Hor. zoom 1024pt.
pos. 0pt.

Rec. len. 1024pt.



Sequence Main only
Time base Main 2.00msec/pt.: 205.msec/div
Trg. pos. -80%: -1.29000sec
level 90%: 1.820V
hys. 1%: 40.00mV
Trg. time 18.9059s 03sec

Cursor measurement
-868.000msec (x-o): 4.2700V (x)
864.000msec (←x): -2.7200V (←x)

Figure 33: Courbe de solidification de l'essai Z14

Tableau 5 Résultats des essais de soudage GTAW par point sur acier au carbone

IDENTIFICATION		I (A)	Temps d'arc (s)		Paramètres mesurés sur l'enregistrement oscilloscopique			Paramètres mesurés par le microordinateur							Paramètres mesurés sur les échantillons	
					t_f (s)	C °C/s		t_f (s)	C °C/s	G (°C/mm)	D_a (mm)	D_G (mm)	W (mm)		D (mm)	W (mm)
X1		70	5		0,200	3940		0,244	3340	269	1,68	1,37	3,6		1,32	3,0
X2		75	5		-	-		0,313	2380	236	1,82	1,54	3,1		1,0	3,3
X3		75	5		0,238	2790		0,219	2600	228	1,33	1,04	4,1		1,10	3,0
X4		80	5		0,310	2000		0,386	1970	229	2,04	1,84	3,9		1,40	3,6
X5		85	5		0,288	2060		0,338	2030	244	1,82	1,72	4,6		1,45	3,7
X6		90	5		0,346	2000		0,404	2050	215	2,18	1,81	5,0		1,82	4,6
X7		90	5		0,368	1380		0,429	1580	255	2,03	2,28	5,1		2,0	4,1
X8		95	5		0,430	1970		0,475	1750	210	2,37	2,08	6,0		1,95	4,7
X9		100	5		0,612	1260		0,647	1180	273	2,63	3,68	5,8		3 (complète 0,95	4,6
C1		80	3		-	-		0,187	4390	268	1,48	1,05	4,1			3,3
C2		110	15		-	-		0,931	1140	179	3,75	3,48	6,0		3 (complète)	5,2
B1		90	8		-	-		0,384	2800	242	2,42	1,94	4,2		1,70	4,6
B2		90	8		-	-		0,349	2640	238	2,13	1,73	3,7		1,75	4,2
B3		90	8		-	-		0,362	3270	240	2,47	1,81	4,7		1,75	4,4

Tableau 5 (suite)

IDENTIFICATION		I (A)	Temps d'arc (s)		Paramètres mesurés sur l'enregistrement oscilloscopique			Paramètres mesurés par le microordinateur							Paramètres mesurés sur les échantillons	
					t_f (s)	$C_{\bar{T}}$ °C/s		t_f (s)	$C_{\bar{T}}$ °C/s	G_0 (°C/mm)	D_s (mm)	D_G (mm)	W (mm)		D (mm)	W (mm)
B4		90	8		-	-		0,382	2780	232	2,39	1,85	4,7		1,82	4,5
B5		90	12		-	-		0,360	2325	215	2,07	1,62	5,2		1,77	4,7
B6		90	15		-	-		0,389	1879	224	2,0	1,82	5,5		1,85	5,1
A1		90	6		0,380	2225		0,430	2082	-	2,33	-	-		1,97	-
A2		90	4		0,256	2592		0,302	2885	-	1,93	-	-		1,50	-
A3		80	6		0,196	3250		0,244	3268	-	1,67	-	-		1,25	-
A4		80	5		0,156	2555		0,196	3300	-	1,34	-	-		1,15	-
A5		80	4		0,130	4040		0,182	4140	-	1,39	-	-		0,95	-
A6		90	8		0,580	1536		0,612	1465	-	2,79	-	-		2,55	-
A7		90	14		0,834	895		0,792	1400	-	3,54	-	-		3 (complète)	-
E1		90	4		0,250	3860		0,284	4120	-	2,17	-	-		1,3	-
E2		90	6		0,320	2711		0,354	2520	-	2,12	-	-		1,90	-
E3		90	10		0,626	1350		0,666	1850	-	3,41	-	-		3 (complète)	-

dévié), le capteur est alors décentré et détecte successivement le passage du front de solidification puis la fin de solidification mais avec une transition très atténuée. Pour remédier à ce problème il faudrait disposer d'une matrice de capteurs et ne retenir que le temps de solidification le plus long détecté par ces capteurs.

D'autres observations peuvent être tirées de ces résultats:

- Le temps de solidification mesuré par l'ordinateur excède toujours de 50 ms environ le temps mesuré sur la courbe de refroidissement enregistrée. Ceci doit être attribué au délai entre le moment de l'extinction de l'arc et la réception du signal d'extinction par le microordinateur.

- Les mesures de vitesse de refroidissement après solidification (C_r) sont en général en accord satisfaisant. On constate de moins grandes variations dans les valeurs calculées par le microordinateur car celles-ci sont déduites d'un signal filtré contrairement aux valeurs calculées d'après l'enregistrement oscilloscopique.

- L'erreur relative moyenne sur la largeur de bain mesurée par le microordinateur est de 7,1% (erreur maximale 19%). Il y a plusieurs sources d'erreurs, une erreur systématique par excès, due au fait que le niveau auquel on mesure la largeur sur le profil thermique (seuil) est légèrement au-dessous des transitions. Cette erreur peut être partiellement corrigée en ajustant la valeur attribuée à la vitesse de balayage, on ne peut toutefois l'éliminer totalement car cette erreur systématique est fonction des gradients thermiques latéraux, elle est d'autant plus faible que les gradients sont plus grands. Les autres sources d'erreur sont liées au positionnement du capteur qui doit balayer le bain au niveau de sa largeur maximale.

6.2 Soudage GTAW par point sur acier au carbone

Tous les essais sur acier au carbone ont été réalisés avec des plaques de 3 mm d'épaisseur.

Les essais ont consisté à faire des pénétrations partielles ou complètes dans une plaque.

Les résultats de 27 expériences sont rassemblés dans le tableau 5. Les temps de solidification variaient de 0,13 s à 0,931 s et les profondeurs de pénétration de 0,95 à la pénétration complète (3 mm). Dans cette gamme le microordinateur était en mesure de réaliser la détection à tout coup. Les paramètres du microordinateur (tableau 6) sont les mêmes que pour l'acier inoxydable à l'exception des constantes K_C et K_s et de la température de fusion. La constante K_C déterminée expérimentalement (4790) est très proche de la valeur théorique calculée à partir des constantes physiques de l'acier au carbone (5180)[2]. Pour K_s nous avons choisi une valeur (1190) qui donne la meilleure approximation de la pénétration complète.

Paramètres acier au carbone

1.	FILTREV_S	Temperature 0015
2.	FILTREV_D	Temperature 0012
3.	FILTREDV	Derivee seconde .. 0025
4.	MINLGDS	Longueur minimum . 0025
5.	SNODERS	Seuil detection .. -0100
6.	DLFSLD	attente sol. (ms) . 700
7.	K_GRU	Facteur K (grd) ... 479
8.	K_CAL_SOL	Calibration 0713
9.	S_CAL_SOL	Calibration 0715
10.	A_CAL_BAL	Calibration 0132
11.	KSPSHF	Facteur K-(X 100) 1190
12.	VIT_VER	Vitesse (mm/s) 36
13.	DELTA_T1	Temps 91 (10ms) .. -0001
14.	DELTA_T2	Temps 92 (10ms) .. -0001
15.	DELTA_T3	Temps 93 (10ms) .. -0001
16.	T_FUS	Temp. fusion 1500

Tableau 6 Paramètres du microordinateur pour l'acier au carbone

Acier au carbone essai A 1

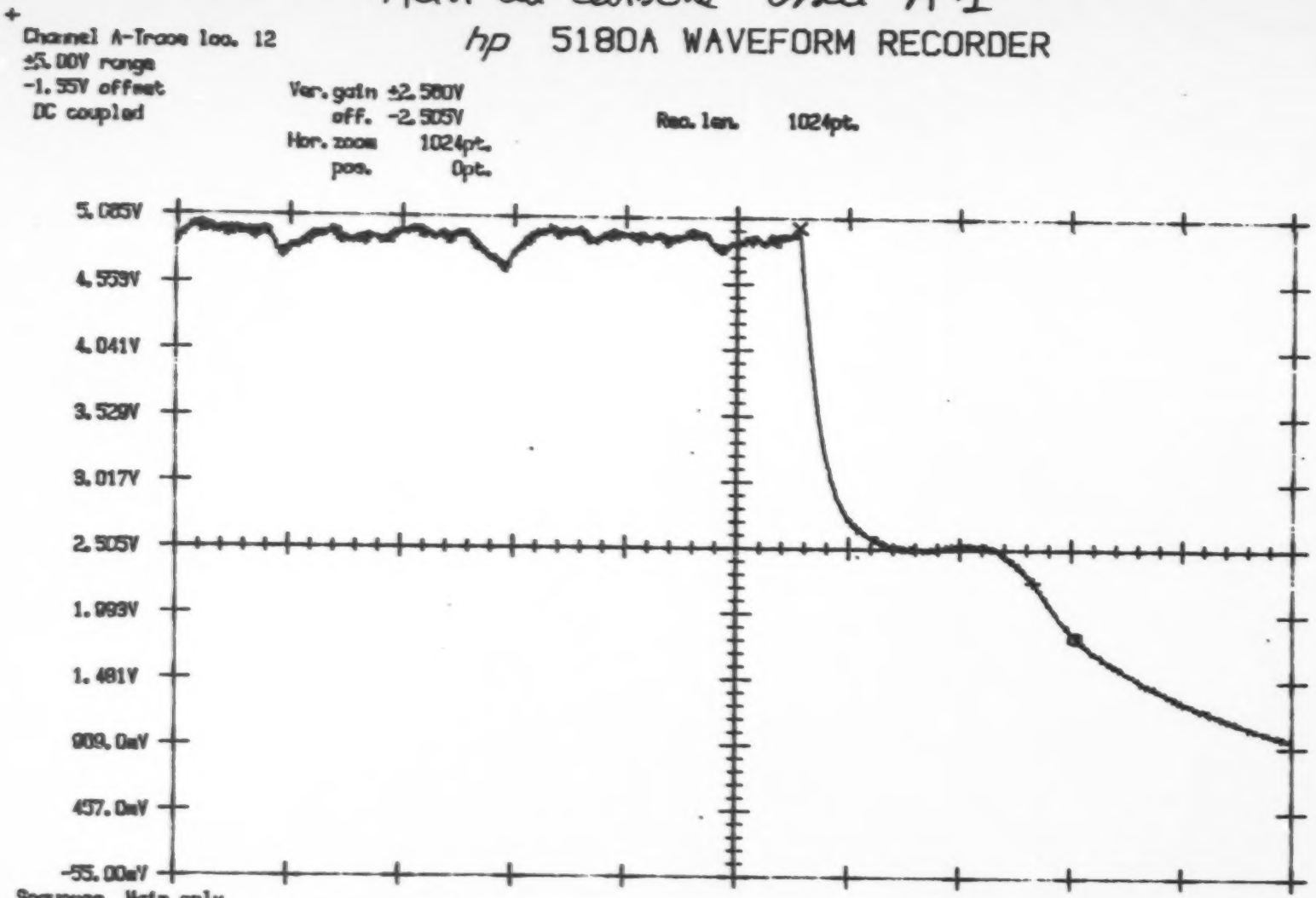


Figure 34: Courbe de solidification de l'essai A1

Acier au carbone essai A2

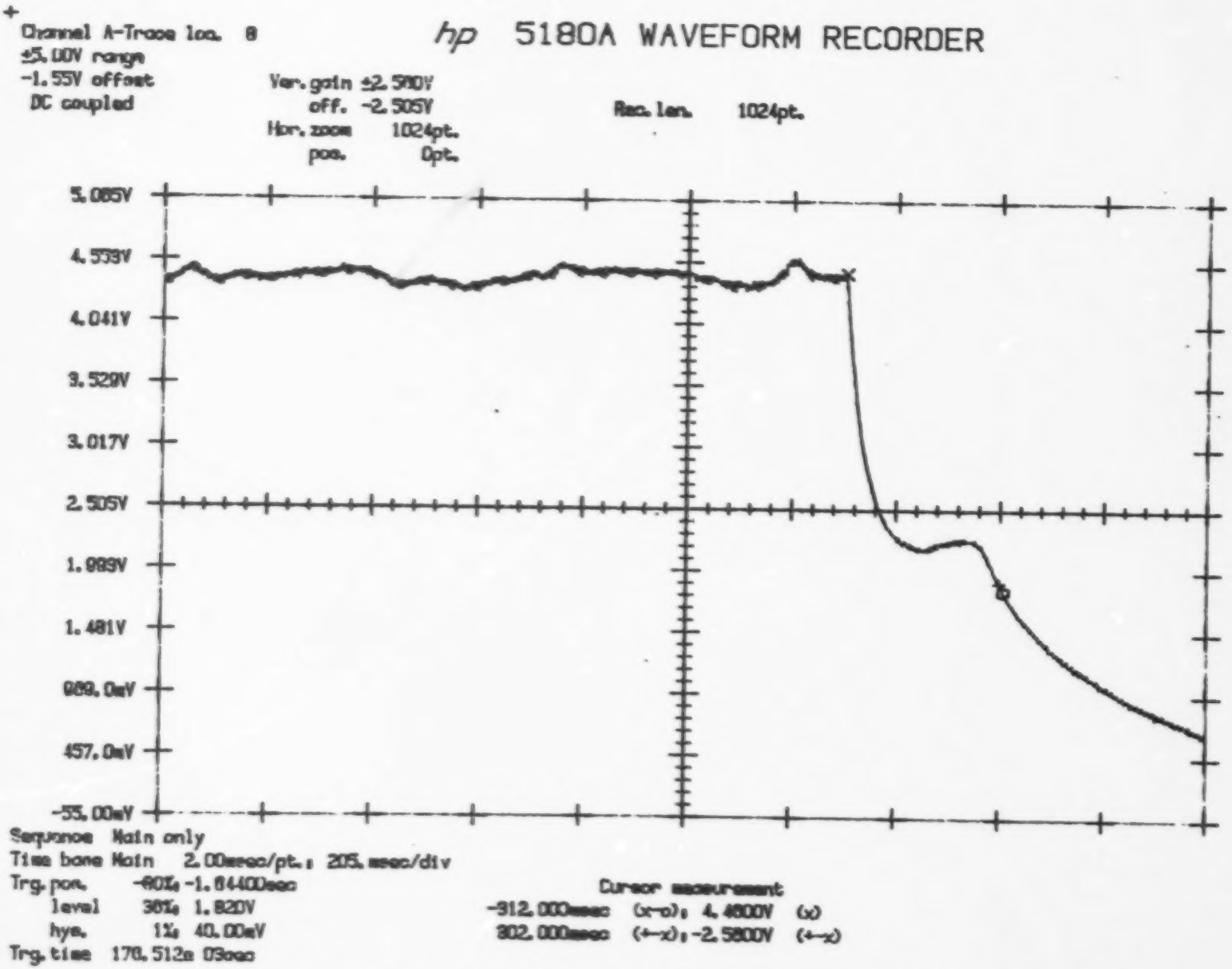


Figure 35: Courbe de solidification de l'essai A2

Acier au carbone essai A3

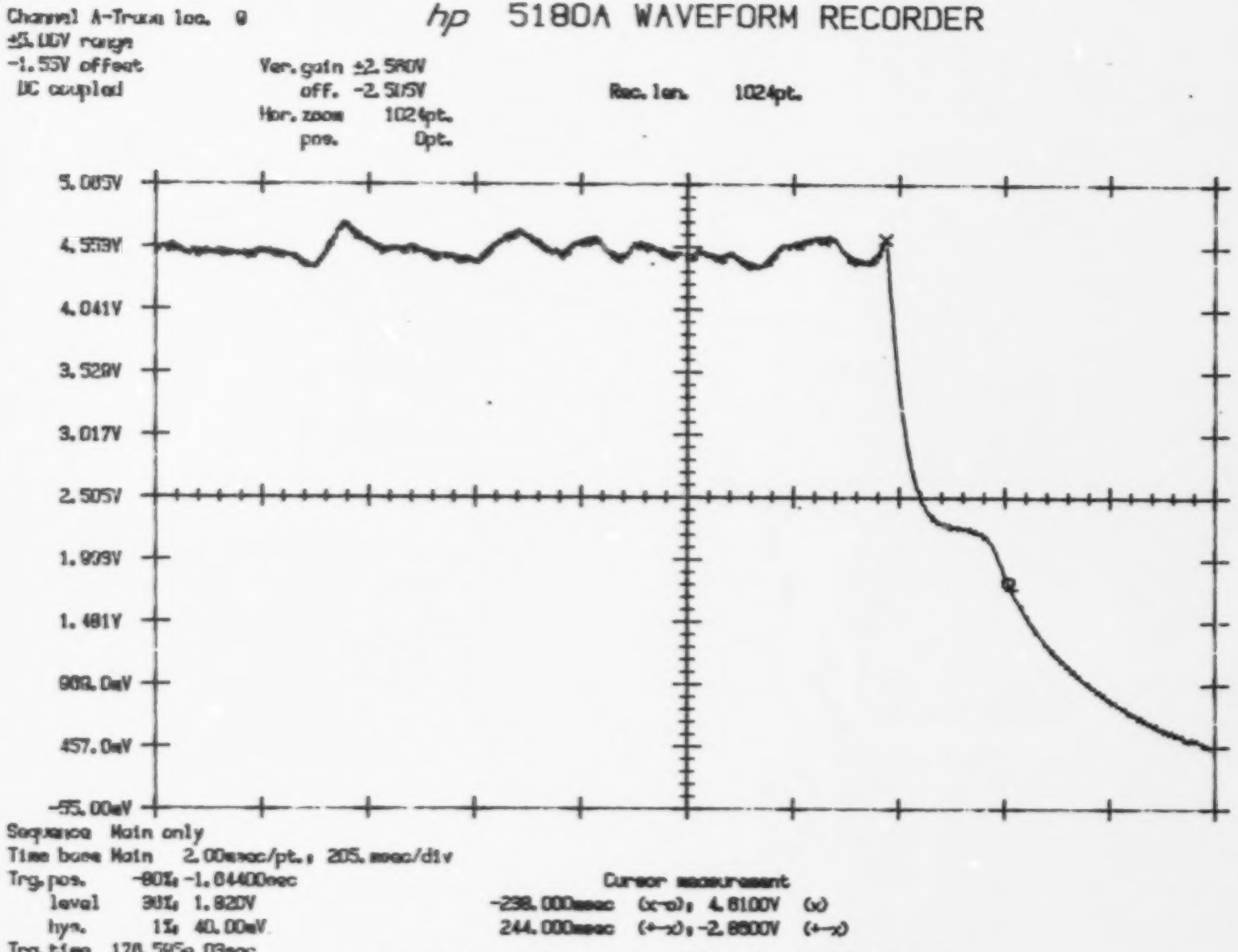


Figure 36: Courbe de solidification de l'essai A3

Acier au carbone Essai A4

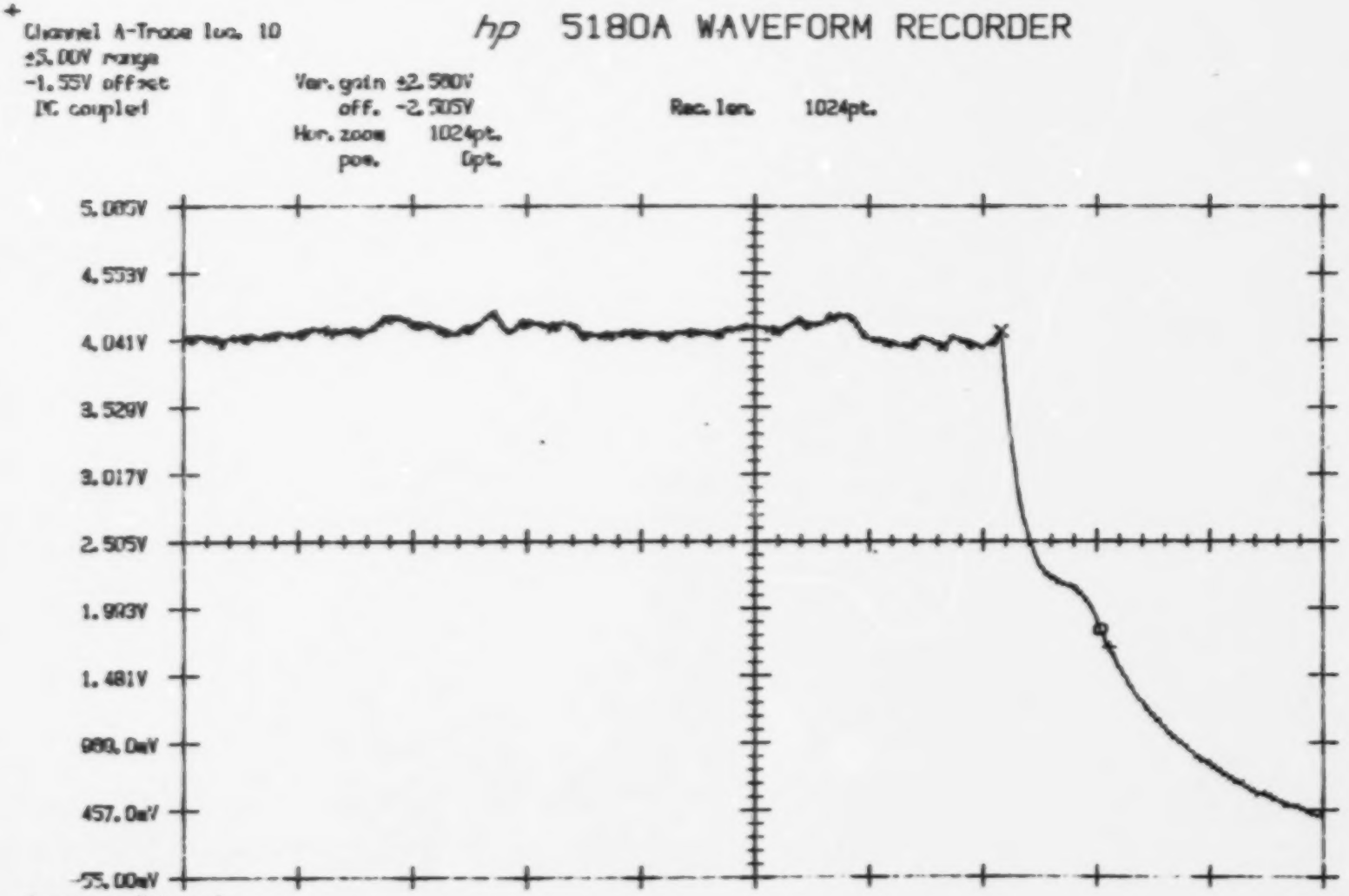


Figure 37: Courbe de solidification de l'essai A4

Acier au carbone essai A5

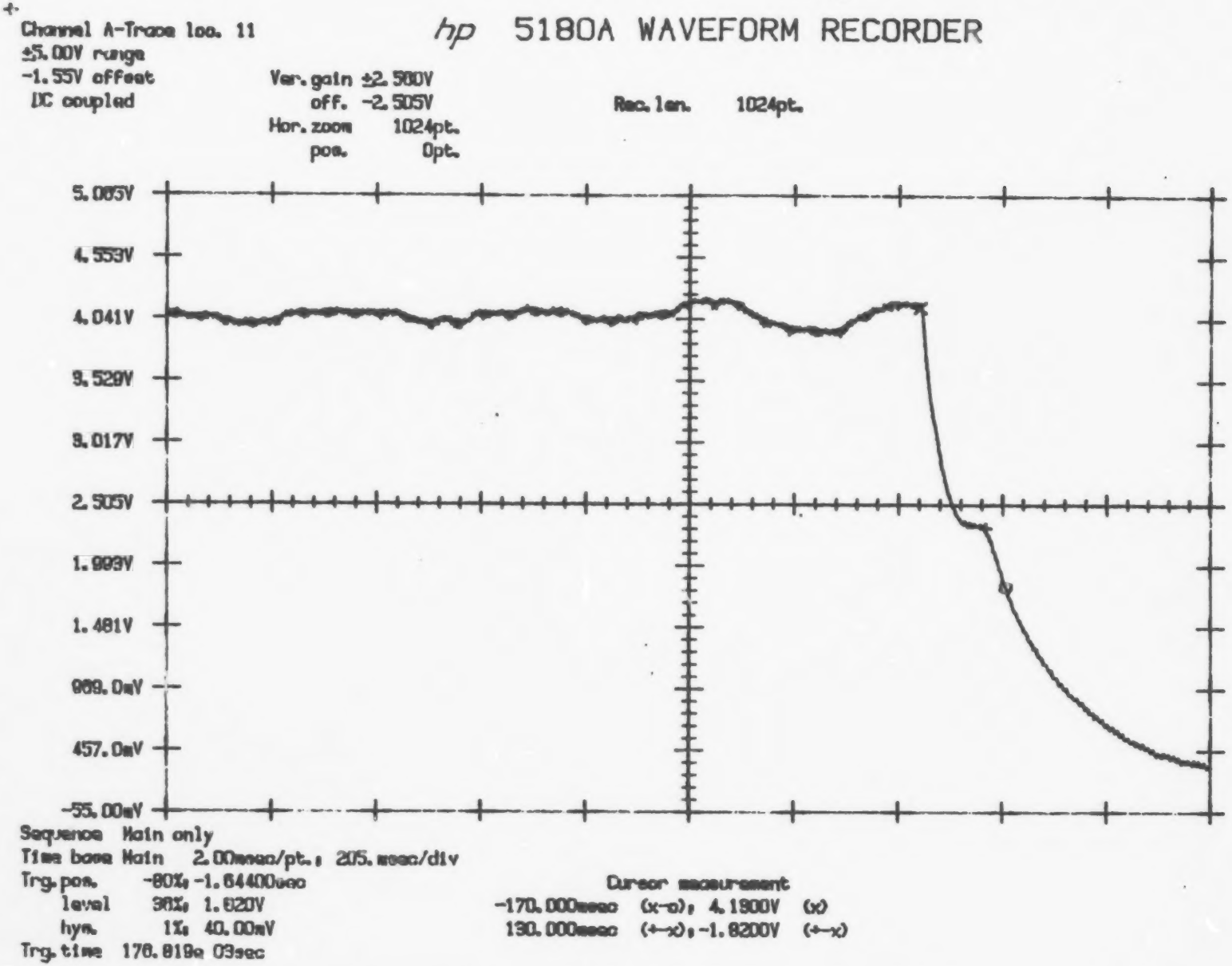


Figure 38: Courbe de solidification de l'essai A5

Acier au carbone . Essai A7

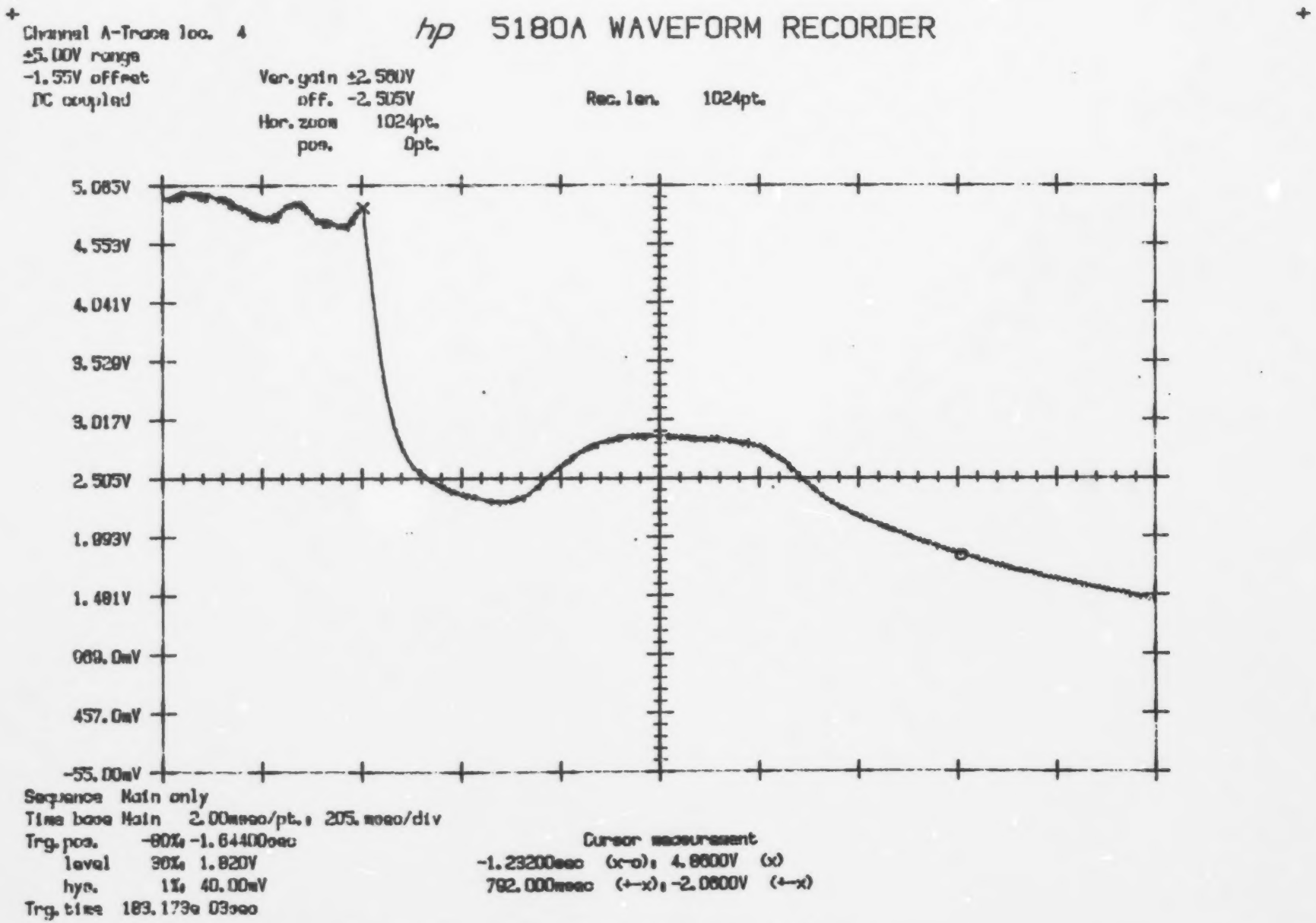


Figure 40: Courbe de solidification de l'essai A7

Une série de sept courbes de refroidissement est jointe à ce rapport (figures 34 à 40).

L'erreur relative moyenne sur la pénétration (en excluant les pénétrations complètes) calculées par la méthode de la vitesse de refroidissement est de 30,2% avec un maximum de 82% (essai X2).

Pour les quinze essais où nous avons calculé la pénétration à partir des gradients thermiques, l'erreur relative moyenne est de 11,7% avec un maximum de 54% (essai X2).

On constate que la mesure des gradients thermiques est plus fiable sur l'acier au carbone que sur l'acier inoxydable, probablement parce que les variations d'émissivité dans le solide sont moins grandes (surface oxydée). De façon à mieux visualiser la précision des mesures nous avons reporté les résultats sur un graphique (figure 41). Les points D_S sont systématiquement trop hauts sur le graphique, on peut donc améliorer la précision de la mesure de pénétration partielle en modifiant la constante K_S. Ainsi avec $K_S = 950$, l'erreur relative moyenne n'est plus que de 11,6%, toutefois l'erreur devient importante pour les essais de pénétration complète, puisque avec cette valeur de K_S la pénétration calculée est toujours inférieure à 3 mm pour les quatre essais de pénétration complete (X9, C2, A7 et E3).

L'équation que nous avons utilisée ne s'applique donc pas parfaitement sur toute la gamme de pénétration. Par contre les valeurs de D_G présentent un bon accord avec les valeurs expérimentales sur toute la gamme de mesure.

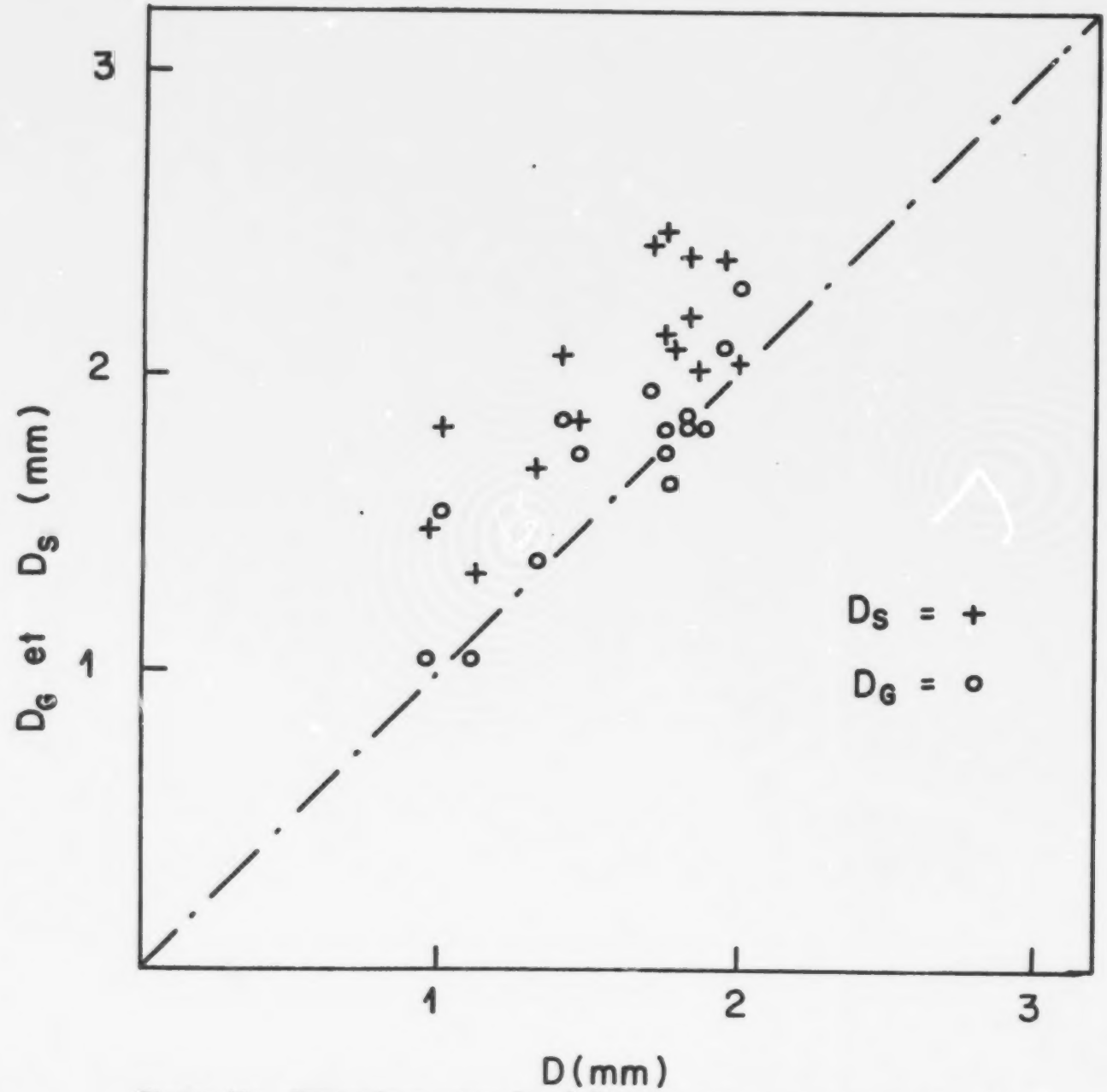


Figure 41: Comparaison entre la pénétration mesurée par le système à microordinateur et la pénétration réelle

7. CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet nous avons mis au point un système de mesure de pénétration par capteur infrarouge totalement automatisé. L'inconvénient principal de cette technique de mesure est qu'elle interfère avec la procédure de soudage puisqu'elle nécessite une interruption de l'arc et une solidification complète du bain, elle ne peut donc s'appliquer que sur des métaux qui ne sont pas sensibles à la fissuration à chaud. Un domaine d'application possible est le soudage par point de tôles d'acier inoxydable. On peut également utiliser cette technique pour accélérer la mise au point des procédures de soudages ou identifier rapidement des problèmes de pénétration sur des lots d'acier.

Un certain nombre d'améliorations peuvent être apportées au système de mesure pour en faciliter l'utilisation:

- Détection à une longueur d'onde plus élevée, 10 μ environ, pour éliminer complètement l'interférence de l'arc.

- Utilisation d'un réseau de fibres optiques pour s'affranchir du balayage mécanique très encombrant.

- Adjonction d'un système de correction de l'émissivité (détection simultanée à deux longueurs d'ondes différentes par exemple) de façon à améliorer la précision sur les gradients thermiques latéraux.

Notons que l'utilisation du réseau de fibre permettra d'éliminer l'erreur de positionnement au centre du bain lors de la mesure du temps de solidification.

Avec ces améliorations on peut expérer atteindre une précision de 10 à 15% sur la mesure si l'on utilise la méthode des gradients thermiques latéraux.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Modèle de solidification

Figure 2: Courbes de refroidissement d'un bain de fusion dans un acier au carbone enregistrées simultanément par le pyro 1 (courbe inférieure) et le pyro 2 (courbe supérieure)

Figure 3: Profil thermique obtenu avec le pyro 1 lors du balayage transversal d'une bande d'acier inoxydable chauffée à 1163°C

Figure 4: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

Figure 5: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

Figure 6: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

Figure 7: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

Figure 8: Courbe de solidification de bains de fusion (acier au carbone)

Figure 9: Profil thermique transversal d'un bain de fusion dans une plaque mince d'acier inoxydable. Temps d'arc: 2 s

Figure 10: Temps d'arc: 3 s

Figure 11: Temps d'arc: 4 s

Figure 12: Temps d'arc: 5 s

Figure 13: Temps d'arc: 7 s

Figure 14: Résultats d'un essai de balayage typique

Figure 15: Schéma bloc du système à microordinateur

Figure 16: Panneau avant du système à microordinateur

Figure 17: Panneau arrière du système à microordinateur

Figure 18: Panneau arrière du microprocesseur AMPTRAK

Figure 19: Montage de soudage par point de capteurs infrarouges à fibre optique

Figure 20: Courbe de solidification de l'essai Z1

Figure 21: Courbe de solidification de l'essai Z2

Figure 22: Courbe de solidification de l'essai Z3

Figure 23: Courbe de solidification de l'essai Z4

Figure 24: Courbe de solidification de l'essai Z5

Figure 25: Courbe de solidification de l'essai Z6

Figure 26: Courbe de solidification de l'essai Z7

Figure 27: Courbe de solidification de l'essai Z8

Figure 28: Courbe de solidification de l'essai Z9

Figure 29: Courbe de solidification de l'essai Z10

Figure 30: Courbe de solidification de l'essai Z11

Figure 31: Courbe de solidification de l'essai Z12

Figure 32: Courbe de solidification de l'essai Z13

Figure 33: Courbe de solidification de l'essai Z14

Figure 34: Courbe de solidification de l'essai A1

Figure 35: Courbe de solidification de l'essai A2

Figure 36: Courbe de solidification de l'essai A3

Figure 37: Courbe de solidification de l'essai A4

Figure 38: Courbe de solidification de l'essai A5

Figure 39: Courbe de solidification de l'essai A6

Figure 40: Courbe de solidification de l'essai A7

Figure 41: Comparaison entre la pénétration mesurée par le système à microordinateur et la pénétration réelle

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres calculés par l'ordinateur pour détecter les transitions dans le profil thermique

Tableau 2: Paramètres du microordinateur pour l'acier inoxydable

Tableau 3: Résultats expérimemtaux fournis par le système de mesure pour l'essai Z1

Tableau 4: Résultats de 14 essais de soudage GTAW par point sur acier inoxydable

Tableau 5: Résultats des essais de soudage GTAW par point sur acier au carbone

Tableau 6: Paramètres du microordinateur pour l'acier au carbone

RÉFÉRENCES

[1] J.-L Fihey, "Régulation en temps réel du soudage automatique à l'arc électrique, Rapport final" IREQ, 2629 (1982).

[2] J.-L. Fihey, P. Cielo, G. Bégin, "On Line Weld Penetration Measurement Using an Infrared Sensor", Proceedings, International Conference on Welding in Energy Related Projects, Toronto, Canada (1983).

[3] P. Girard, Bruce Hazel, J.-L. Fihey, "Système à microordinateur pour la mesure des paramètres d'un bain de soudage". Rapport. IREQ (1984).

Rapport # 12DS-3115-2-5017

DISTRIBUTION

Première page (avec sommaire) seulement:
VPE - TAI; VP - IREQ; Directeurs

Au complet:

MM. Hughes Marquis..(IGM)....(6)

R. Roberge.....IREQ.....

G. Bégin.....IREQ.....

R. Blais.....IREQ.....

Bibliothèque.....(5)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....